

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Problematika svařování materiálů S355J2+N
velkých tloušťek

The Issue of Welding Materials S355J2+N Large
Thicknesses

Student:

Bc. Ondřej Laník

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ondřej Laník**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Problematika svařování materiálů S 355J2+N velkých tloušťek**
The Issue of Welding Materials S355J2 + N Large Thicknesses
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Prostudujte problematiku svařitelnosti materiálu S355J2+N
- 2) Navrhněte možné způsoby svařování této oceli o tloušťkách až 400 mm
- 3) Zpracujte detailní technologický postup svařování tlačných sloupů z materiálů S355J2+N
- 4) Navrhněte metodiku ověření uživatelských vlastností svarových spojů tlačných sloupů
- 5) Realizujte bod 3) a 4)
- 6) Proveďte diskuzi dosažených výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:

KOUKAL, J., SCHWARZ, D., HAJDÍK, J. *Materiály a jejich svařitelnost: Učební texty*. 1. vydání. VŠB-TU Ostrava. 2009. 240 s. ISBN 978-80-248-2025-5
HRIVNÁK, I. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. 1. vydání. VSAV Bratislava. 1989. 344 s. ISBN 80-224-0016-5
ČSN EN ISO 15614-1 *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupů svařování - Část 1: Obloukové a plamenové svařování ocelé a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. Praha: Český normalizační institut, 2005


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016





doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.


V Ostravě 24. 4. 2016


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomové práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 24. 4. 2016


.....
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Ondřej Laník

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Příbor, Prchalov 84, 742 58

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. LANÍK O., *Problematika svařování materiálů S355J2+N velkých tloušťek: Diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2016, 54 s. Vedoucí práce: Schwarz, D.

Úvodní část práce tvoří popis charakteristických vlastností konstrukční oceli S355J2+N se zaměřením na její jemnozrnnou mikrostrukturu a stanovení vhodných podmínek svařitelnosti oceli tohoto typu. Pro tavné spojení materiálů velkých tloušťek jsou popsány způsoby a metody svařování s ověřením užitečných vlastností na kontrolním svarovém spoji prostřednictvím destruktivních a nedestruktivních metod. Na základě vyhodnocení dle ČSN EN ISO 15 614-1, byl vytvořen detailní technologický postup provedení svarového spoje tlačného sloupu z plechů tloušťky 400 mm vyrobených z oceli S355J2+N.

Klíčová slova: mikrolegovaná ocel, svařitelnost, ověření vlastností, chemické složení

ANNOTATION OF MASTER THESIS

Bc. LANÍK O., *The Issue of Welding Materials S355J2+N Large Thicknesses: Master Thesis*. Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Technology, 2016, 54 p. Thesis head: Schwarz, D.

Introductory part consists of a description of the characteristics of structural steel S355J2 + N to focus on its fine-grained microstructure and the appropriate terms of weldability of steel this type. For the fusion of the material of the large thicknesses disclosed are methods and welding methods with verification of service properties to control the weldment through destructive and non-destructive methods. Based on an evaluation according to CSN EN ISO 15 614-1, was created to close the technological process design of weld joint pressure column of sheet thickness of 400 mm made of steel S355J2 + N.

Keywords: microalloyed steel, weldability, verification of properties, chemical composition

Obsah

Seznam zkratk a použitého značení	8
1 Úvod	9
2 Charakteristické vlastnosti oceli S355J2+N	10
3 Svařitelnost oceli S355J2+N	12
3.1 Výroba plechů z materiálu S355J2+N	12
3.2 Jemnozrnná struktura oceli.....	12
3.3 Podmínky svařitelnosti	13
3.4 Technologické zásady svařování.....	13
3.5 Vhodné přídavné materiály	14
3.6 Tepelné zpracování - PWHT	14
4 Metody svařování plechů velkých tloušťek z materiálu S355J2+N.....	15
4.1 Svařování automatem pod tavidlem do úzkého úkosu.....	15
4.2 Elektrostruskové svařování	17
5 Detailní technologický postup svařování tlačných sloupů P400	19
6 Ověření užitných vlastností svarových spojů z materiálu S355J2+N	20
6.1 Vizuální kontrola - VT	21
6.2 Magnetická kontrola - MT	22
6.3 Ultrazvuková kontrola - UT	22
6.4 Příčná zkouška tahem svarového spoje	22
6.5 Podélná zkouška tahem svarového kovu.....	23
6.6 Zkouška lámavosti.....	23
6.7 Zkouška nárazové práce Charpy-V	24
6.8 Zkouška makrostruktury	25
6.9 Zkouška mikrostruktury	26
6.10 Zkouška tvrdosti.....	27
7 Vyhodnocení zkoušek kontrolního svarového spoje z materiálu S355J2+N	28
7.1 Nedestruktivní kontroly VT, MT a UT	28
7.2 Destruktivní kontroly	28
8 Svařování tlačných sloupů P400 dle DTPS	32
8.1 Popis tlačných sloupů P400.....	32
8.2 Předehřev svarových spojů.....	33
8.3 Svařování segmentů tlačného sloupu	34

8.4	Závěrečná montáž	35
9	Vadné oblasti ve svarových spojích při skutečném svařování plechů P400	36
9.1	Fotodokumentace z průběhu svařování plechů P400	36
9.2	Analýza příčin porušení plechů P400.....	37
9.3	Výsledková část.....	38
9.4	Kontrolní rozbor chemického složení	39
9.5	Fraktografický rozbor.....	40
9.6	Metalografický rozbor.....	43
9.6.1	Makrostruktura	43
9.6.2	Mikrostruktura.....	44
9.7	Výsledné zhodnocení detailní analýzy.....	47
10	Způsob opravy vadných oblastí svarového spoje tlačných sloupů.....	48
11	Závěr	49
	Seznam obrázků	50
	Seznam tabulek.....	52
	Seznam použité literatury	53
	Seznam příloh	54

Seznam zkratek a použitého značení

<u>Značka</u>	<u>Název</u>	<u>Jednotka</u>
R _m	mez pevnosti	MPa
R _e	mez kluzu	MPa
R _{p0,2}	smluvní mez kluzu	MPa
A ₅	tažnost	%
KV	nárazová práce	J
HV10	tvrdost (Vickers)	-
hm.	hmotnostní podíl	%
C _{EV}	uhlíkový ekvivalent dle IIW	-
H.C.S	Hot Cracking Susceptibility (náchylnost na tvorbu horkých trhlin)	-

Automat pod tavidlem (SAW)	121
Elektrostruskové svařování (ESW)	721
Kontrolní svarový spoj	KSS
Základní materiál	ZM
Svarový kov	SK
Tepelně ovlivněná oblast	TOO
Tepelné zpracování	TZ
Tepelné zpracování po svaření	PWHT
Vzorek tahové zkoušky svarového spoje	T _n
Vzorek vrubové houževnatosti svarového kovu	VWT _{x/y}
Vzorek vrubové houževnatosti tepelně ovlivněné oblasti	VHT _{x/y}

1 Úvod

Počátky použití mikrolegovaných ocelí se datují do 40. let 20. století. Rozvoj a větší využití těchto ocelí se uskutečnil v letech 1960-1961. První mikrolegovaná ocel s přísadou hliníku s označením *IN*, byla hlubokotažná, nízkolegovaná ocel s přísadou hliníku, vyrobená v USA. Funkcí této přísady je dezoxidace oceli a vazba stabilních nitridů AlN na intersticiální dusík za účelem zvýšení odolnosti proti stárnutí. Téměř ve stejnou dobu začaly vznikat oceli s přísadou hliníku, titanu a dále pak vývoj ocelí s přísadou niobu a bóru s vazbou dusíku na nejstabilnější nitridy bóru. [11]

Výroba těchto ocelí směřovala k zachování vysoké pevnosti a zároveň zaručení podmínek svařitelnosti mikrolegovaných materiálů. Toho se dosáhlo uplatněním různých druhů fyzikálně mechanických zpevnění mikrostruktury, které umožnily při zachování požadované pevnosti oceli snížení obsahu uhlíku pod 0,25% hm. [11]

V současnosti dosahují mikrolegované jemnozrnné oceli výborného poměru plastických a pevnostních vlastností se zachováním nízkého obsahu uhlíku. Typickým představitelem je svařitelná ocel S355J2+N, která je pro svou širokou oblast využití nejběžněji zvoleným konstrukčním materiálem. Tento materiál zaručuje vysokou pevnost a tuhost svařené konstrukce, zároveň splňuje značné nároky na provedení konstrukčních celků s vyšší mezí kluzu, staticky i dynamicky namáhaných.

Se stále zvyšujícími se technologickými požadavky na tyto konstrukce, zvyšují se také nároky na konstrukční materiály a s tím souvisí použití tlustostěnných plechů a profilů s tloušťkou stěny až 400 mm. Jejich výroba oproti běžným tenkostěnným materiálům vyžaduje maximální dodržení technologických zásad výroby pro zajištění homogenity a metalurgické čistoty struktury materiálu v celém průřezu výrobku.

2 Charakteristické vlastnosti oceli S355J2+N

Dle ČSN EN 10027-1 s označení oceli S355J2+N vyplývá:

S.....konstrukční ocel

355.....hodnota meze kluzu $R_e = 355 \text{ MPa}$, platí pro tloušťku plechu $t < 16 \text{ mm}$

J2.....hodnota nárazová práce 27J při -20°C

N..... svařitelná jemnozrnná ocel za tepla normalizačně válcovaná

Označení materiálu dle ČSN EN 10027-2.....1.0577

Dále je tento materiál zařazen do české technické normy ČSN EN 10 025-2, specifikující technické dodací podmínky, které jsou uvedeny v tab. 1 a 2 pro ploché výrobky tloušťky 400 mm.

Tato ocel je zařazena dle CEN ISO/TR 15 608 do skupiny materiálů 1, která se dále dělí na podskupiny (1.1 ÷ 1.4), v níž je zařazena do podskupiny 1.2 se zaručenou mezí kluzu R_e v závislosti na tloušťce materiálu.

Tab. 1 - Chemické složení pro ploché a dlouhé výrobky tloušťky 400 mm [2]

Obsah chemického prvku v hm. %										
C max.	Si max.	Mn max.	P max.	S max.	Cu max.	Al min.	Ti max.	Nb max.	V max.	C_{EV} max.
0,24	0,60	1,70	0,035	0,035	0,60	0,015	0,15	0,04	0,1	0,49

Tab. 2 - Mechanické vlastnosti za okolní teploty pro ploché výrobky tloušťky 400 mm [2]

min. R_e [MPa]	R_m [MPa]	min. A [%]	min. KV [J]
265	450-600	17	27 (-20°C)

Mikrostruktura jemnozrnné oceli S355J2+N na obr. 1, tvořena feriticko-perlitickou mikrostrukturou.



Obr. 1 - Mikrostruktura oceli S355J2+N

3 Svařitelnost oceli S355J2+N

3.1 Výroba plechů z materiálu S355J2+N

Cílem při výrobě mikrolegovaných jemnozrnných ocelí je získání rovnoměrného jemného austenitického zrna. V průběhu výroby válcovaných profilů, plechů dochází při jejich válcování k rekrytalizaci a ke stádiu růstu zrna. Počátek stádia růstu primárních zrn kontrolujeme, v němž během válcování dochází u ocelí mikrolegovaných hliníkem a titanem k precipitaci nitridu hliníku AlN nebo karbonitridu titanu Ti (C, N). Tyto částice zpomalují migraci austenitických zrn a tím i jejich růst, takže po ochlazení vývalku dostáváme jemnozrnnou feriticko – perlitickou mikrostrukturu. [11]

Výchozí polotovary těchto ocelí se vyrábějí řízeným válcováním v kombinaci s vhodným tepelným zpracováním. Tento způsobem zpracování nejvíce zvýrazňuje vliv jednotlivých mikrolegur. Obsahy jednotlivých prvků bývají limitovány na hodnoty: Al min. 0,015 hm %, Ti max. 0,15 hm%, V max 0,1 hm % a Nb max 0,04 hm %. [4]

Normalizační válcování N je proces, při němž se v rámci válcování provádí konečná deformace v určité teplotní oblasti (okolo teploty $Ar_3 + 50\text{ }^{\circ}\text{C}$), což vede ke stavu materiálu, který odpovídá stavu získanému po normalizačním žihání (S355J2+N) s tím, že požadované hodnoty mechanických vlastností jsou shodné s mechanickými hodnotami získanými po válcování s následným klasickým normalizačním žiháním (za teploty $Ac_3 + 50\text{ }^{\circ}\text{C}$).

3.2 Jemnozrnná struktura oceli

Svařitelnost oceli S355J2+N je podmíněna především mechanickými vlastnostmi těchto nelegovaných konstrukčních ocelí. Mechanické vlastnosti nejvíce ovlivňuje uhlík a mangan, hodnoty meze kluzu nepřesahují 355 MPa. Dále jsou dolegovány malými obsahy prvků jako Al, Ti, Nb a V. Tyto mikrolegury formou precipitačního zpevnění doplňují ostatní způsoby substitučního a intersticiálního mechanického zpevnění materiálu, které se u nelegovaných konstrukčních ocelí běžně využívají. Vlivem příznivého působení těchto prvků vzniká jemnozrnná struktura a svou vazbou na uhlík a dusík zvětšují pevnostní vlastnosti materiálu. Konkrétně se jedná o nitrid AlN, karbid TiC, karbid NbC a karbid V_4C_3 , dále se zde tvoří karbonitridy Ti, Nb a V (C, N).[4]

Obsah uhlíku v oceli je pro běžné tloušťky limitován na hodnotu 0,25% hm., u tloušťek nad 150 mm je max. přípustná hodnota 0,24% hm. Tyto hodnoty spolu s hodnotou uhlíkového ekvivalentu max. $C_{EV} = 0,49$, zaručují dobrou svařitelnost této oceli převážně tavnými metodami svařování. [2]

3.3 Podmínky svařitelnosti

Dle matematických výpočtů uvedených v normě ČSN EN 1011-2, vycházejících z chemického složení oceli jakosti S355J2+N, je materiál při svařování náchylný na tvorbu horkých trhlin – H.C.S. Ty vznikají při ochlazování svarových spojů z teplot nad 850°C a jsou způsobeny přítomností nízkotavitelných sulfidických vměstků, zejména MnS a FeS, sulfokarbidů, legovaných sirníků a sulfonitridů a to zejména v TOO a SK v oblasti kořenových vrstev svarových spojů. U těchto ocelí proto pro zlepšení podmínek svařitelnosti zařazujeme rafinaci v metalurgickém postupu výroby, což umožňuje limitování obsahu síry a fosforu v chemickém složení na max. 0,02 hm. %.

Tento typ trhlin je charakteristický pro tlustostěnné plechy z jemnozrnných materiálů, neboť s rostoucí tloušťkou klesá stupeň protváření a hodnoty mechanických vlastností, zejména vrubová houževnatost. Dále se zde vyskytují zbytky licí – dendritické struktury s vyššími obsahy uhlíku, síry a fosforu, které nepříznivě ovlivňují tvorbu svarové lázně během procesu svařování.

3.4 Technologické zásady svařování

Oceli této jakosti svařujeme s limitovaným měrným tepelným příkonem a běžné tloušťky bez předehřevu. V oblasti TOO svarového spoje se předpokládá zhrubnutí zrna, zvýšení tvrdosti a tím i pokles plastickým vlastností materiálu. Tento nepříznivý děj se snažíme během svařování eliminovat zvýšením teploty předehřevu $T_p=150-200^{\circ}\text{C}$. [4]

Při použití technologie svařování s vysokým stupněm promísení svarového kovu se základním materiálem, např. pro metodu 121 až 75 %, může svarový kov u niobem legovaných ocelí zkřehnout v důsledku precipitačního zpevnění karbonitridy niobu. V těchto případech je nutno upravit parametry svařování nebo změnit technologii svařování s nižším stupněm promísení. [4]

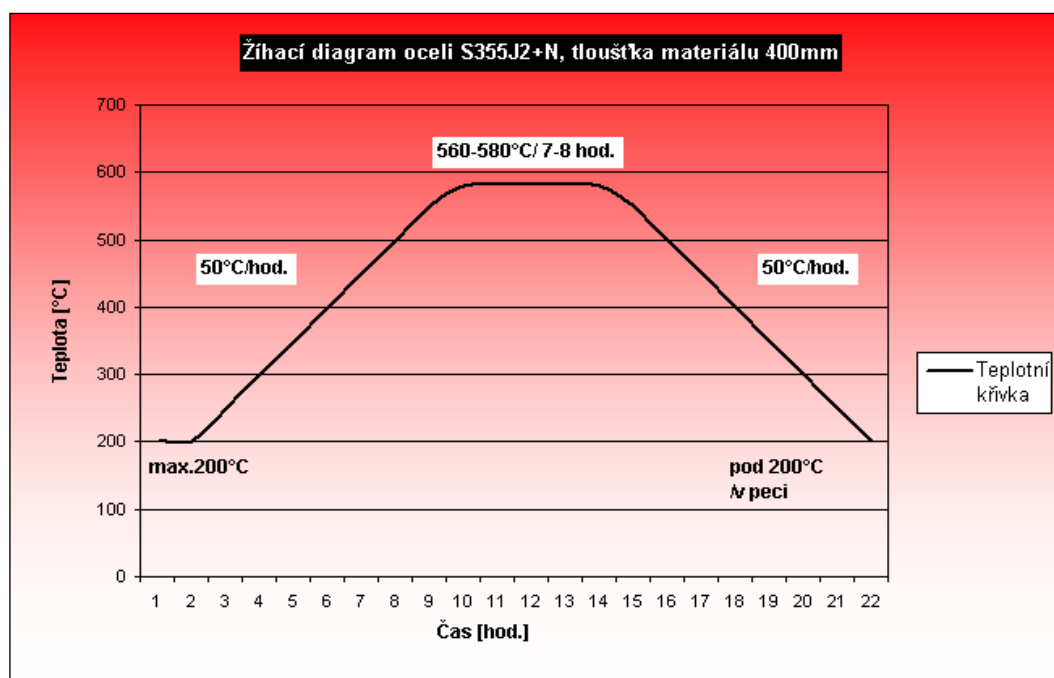
3.5 Vhodné přídatné materiály

Správná volba přídatného materiálu vychází z požadavků na základní materiál. Vzhledem k předpokladu použití oceli S335J2+N do teploty -20°C , není třeba zvláštních požadavků na vrubovou houževnatost svarového kovu, tudíž používáme přídatné materiály legované pouze Mn a Si, zajišťující především pevnostní vlastnosti svarového spoje. Používáme tyto typy přídatných materiálů: E7018, G3Si1, W3Si1 a S3Si1. [4]

3.6 Tepelné zpracování - PWHT

U tuhých konstrukcí, kde se předpokládá použití tlustostěnných profilů a plechů, dochází ve svarovém spoji a okolí ke vzniku velkého pnutí po svařování. Odstranění stavu vysoké napjatosti se provádí žiháním na odstranění vnitřního pnutí – PWHT obr. 2. [4]

Materiály z jemnozrnných mikrolegovaných ocelí jsou precipitačně zpevněny. Teplotu žihání volíme s ohledem na tuto skutečnost a popouštěcí teplotu oceli S355J2+N (610°C). Pro žihání na snížení vnitřního pnutí oceli S355J2+N obvykle volíme teplotní rozmezí $560\text{--}580^{\circ}\text{C}$, tedy minimálně 30°C pod teplotu popouštění oceli. Při těchto teplotách se předpokládá ideálního rozložení pevnostních a plastických vlastností svarového spoje a nedochází k nežádoucím účinkům tepelného zpracování na strukturní vlastnosti základního materiálu S355J2+N. [4]



Obr. 2 - Tepelné zpracování - PWHT

4 Metody svařování plechů velkých tloušťek z materiálu S355J2+N

Nejvhodnější metody svařování těchto typů konstrukcí jsou metody tavného svařování automatem pod tavidlem do úzkého úkosu, označení metody 121 a elektrostruskové svařování, označení metody 721. Jedná se o vysoce produktivní technologie. Množství odtaveného materiálu je 2 – 5x vyšší oproti ručním metodám obloukového svařování. [7]

4.1 Svařování automatem pod tavidlem do úzkého úkosu

Svařovací automat na obr. 3 se skládá z následujících komponent – sloup a výložník typu CaB460, svařovacího zařízení disponující hlavou ESAB HNG-S, řídicí jednotkou ESAB PEH a svařovacím zdrojem LAF 1000 DC.

Oproti svařování metodou 121 do **klasického úkosu** s rozevřením 20-30° (U svar) a 45-70° (V svar), je technologie svařování do **úzkého úkosu** s rozevřením 1-2°, viz obr. 4,

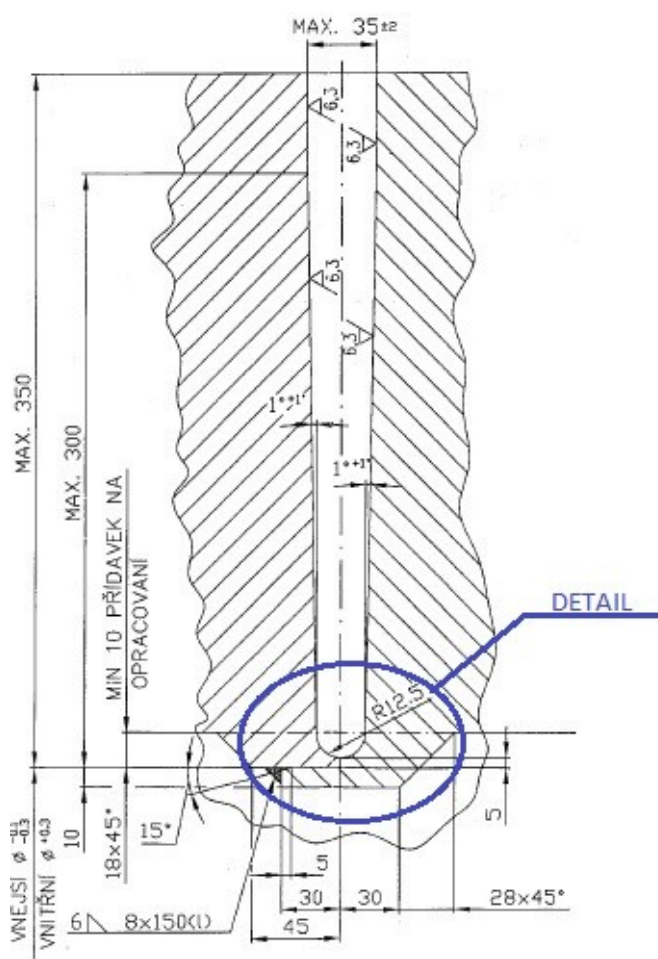


vzhledem k spotřebě přídavného materiálu a času svařování značně úspornější a zároveň zbytková napětí ve svarovém spoji jsou na rozdíl od klasického úkosu nižší.

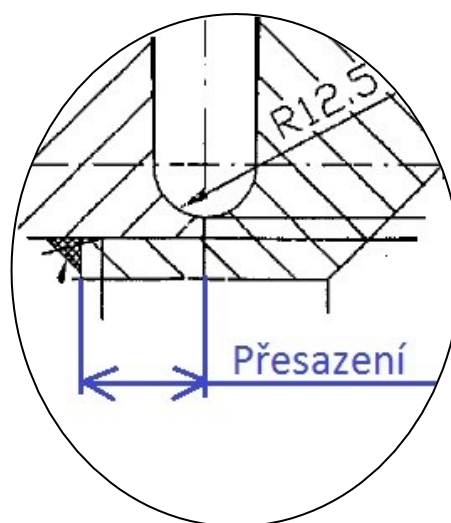
Svařovací hlava je spuštěna po sloupu do největší hloubky úkosu a svařováním kořenové oblasti začíná vyplňování celého objemu svarového kovu pendlovacím způsobem. [7][10]

Obr. 3 - Zařízení pro svařování do úzkého úkosu

Náročná příprava svarových ploch zobrazena na obr. 4, spočívá ve strojním opracování, které zajišťuje podložení kořene svaru tzv. *zámkem* s poloměrem zaoblení $R12,5$ mm a úhlem rozevření 2° . Zaoblení spodní části úkosu je vyrobeno na obou spojovaných materiálech s tím rozdílem, že u jednoho spojovaného materiálu je vytvořeno přesazení 30 mm od vertikální osy svaru, do něhož druhý spojovaný materiál zapadá, viz obr. 5. Po ustavení je poloha obou spojovaných materiálů zajištěna stehovými svary, provedenými ruční metodou svařování. Použití této úpravy svarových ploch je běžné pro tupé jednostranné svary na tlustostěnných profilech a válcových nádobách.



Obr. 4 - Úzký úkos s úhlem rozevření 2°



Obr. 5 - Přesazení spojovaných materiálů

Pro svařování plechů tloušťky 400 mm je zapotřebí značného množství přídavného materiálu, neboť objem svarového kovu se pohybuje v řádech stovek kilogramů. Dále se jedná zejména o svařování rozměrných nebo rotačních těles, kde se předpokládá použití průběžného procesu svařování, kdy odstavení svařovacího zařízení se děje pouze v nezbytně nutných případech (např. výměna cívky drátu nebo tavidla).

4.2 Elektrostruskové svařování

Na obr. 5 jsou vidět dvě jednoúčelová zařízení pro metodu svařování 721. Jedná se o velmi technicky složitá svařovací zařízení, jejichž provoz vyžaduje vysoké nároky na provozní podmínky a finanční náklady. Z těchto důvodů bývá v současnosti tato technologie svařování nahrazována mnohem flexibilnější metodou 121. Podmínka vytvoření svarového spoje na jeden průchod předpokládá důkladnou přípravu a koordinaci svářečského personálu.

Přídavný materiál ve formě páskových elektrod, je upnut do portálů v horní části konstrukce a rychlost spouštění elektrod do svarové lázně se rovná rychlosti svařování. Optimální počet pásových elektrod se určí podle rozměrů svařence.

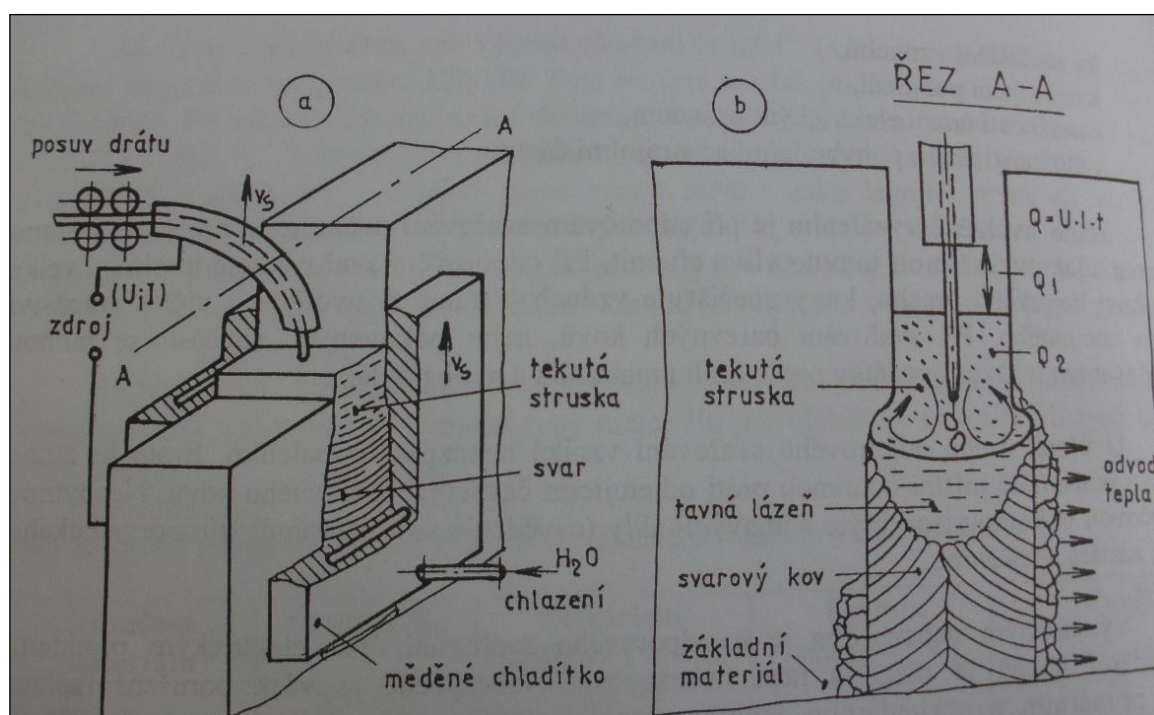


Obr. 6 - Zařízení pro elektrostruskové svařování

Proces elektrostruskového svařování lze svým způsobem zařadit do skupiny tavného i odporového svařování. V první části svařování se jedná o obloukové svařování metodou 121, po dosažení určitého množství tekuté strusky, oblouk zhasíná a přechází se na technologii odporového svařování pod tavidlem, pro kterou je typický stabilní svařovací proud. Svar je tvořen ve svislé poloze, zezdola nahoru a na jeden průchod svařovacího zařízení.

Pro zajištění vyplnění svarové mezery přídavným materiálem, je nutno přivářit ke spodní části obou základních materiálů náběhovou desku – truhlík, který se vyplní jako první a z něj pak pokračuje svarová lázeň směrem vzhůru. Součástí zařízení pro metodu 721 jsou boční přitlačné měděné chlazené desky – žehličky, obr. 6. Ty se pohybují zároveň s postupným vyplňováním objemu svarového kovu. Svařování touto technologií neuvažuje složitou a nákladnou strojní přípravu svarových ploch. [7][9]

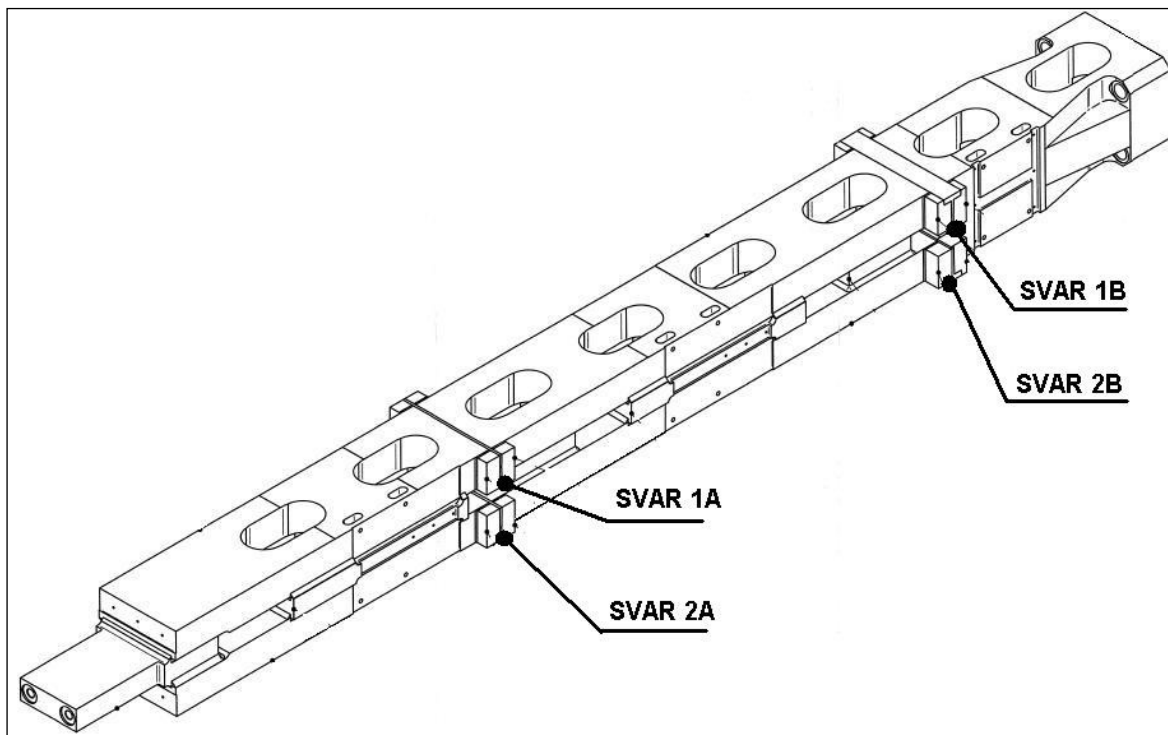
Svarový kov má typickou lící - dendritickou strukturu s hrubou mikrostrukturou a jasnou orientací primárních krystalů ve směru chladnutí. Rychlý odvod tepla do základního materiálu způsobuje vznik hrubozrnné struktury spojený s poklesem plastických vlastností SK a TOO, obr. 6. Pro eliminaci nepříznivých účinků svařování na vlastnosti svarového spoje, se provádí předehřev 200-250°C a po svaření následuje normalizační žihání a popouštění. [9]



Obr. 7 - Detail vyplňování svarové mezery

5 Detailní technologický postup svařování tlačných sloupů P400

Detailní technologický postup svařování – DTPS čtyř svarových spojů na tlačném sloupu P400 je zpracován v PŘÍLOZE A. Jednotlivé svarové spoje mají označení 1A, 1B, 2A, 2B, viz obr. 7.



Obr. 8 - Tlačný sloup P400 s označením svarových spojů

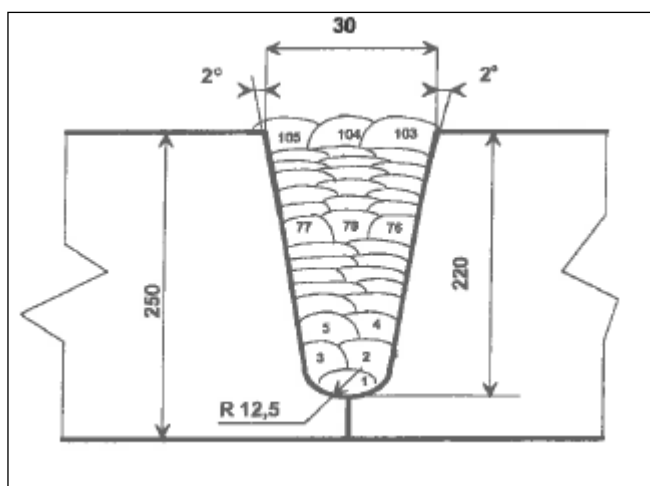
6 **Ověření užitných vlastností svarových spojů z materiálu S355J2+N**

Před samotným započítím svařování tlačných sloupů z plechů P400, je nutnou podmínkou kvalifikovat postup svařování (WPQR) na kontrolním svarovém spoji, dále jen KSS. Rozsah zkoušení pro ověření užitných vlastností svarového spoje byl stanoven dle ČSN EN ISO 15 614-1. Rozmístění zkušebních vzorků pro ověření užitných vlastností na zkušební desce je zobrazeno v PŘÍLOZE B.

Ověření užitných vlastností plechů z materiálu S355J2+N proběhlo na KSS tloušťky 250 mm o rozměrech uvedených v PŘÍLOZE B. Příprava svarových hran, přídatný svařovací materiál a parametry svařování dle pWPS a PŘÍLOHY B.

KSS byl svařován metodou 121 do úzkého úkosu, viz kapitola 4.1 s předehřevem 220°C s přídatným materiálem ø 4,0mm UNION S3Si a tavidlem Böhler UV 418 TT.

Na obr. 8 je znázorněno schéma KSS a postupné kladení svarových housenek č. 1 až č. 105, na který bylo poté aplikováno DT a NDT zkoušení svarového spoje dle rozsahu uvedeném v tab. 3 na str. 21.



Obr. 9 - Zhotovení KSS dle pWPS

Tab. 3 - Rozsah zkoušení KSS dle PŘÍLOHY B

NDT kontroly			
Metoda zkoušení	Označení metody	Technologie provedení:	Stupeň přípustnosti:
Vizuální	VT	EN ISO 17 637	EN ISO 5817 B
Magnetická - prášková	MT	EN ISO 17 638	EN ISO 5817 B
Ultrazvuková	UT	EN ISO 17 640	EN ISO 5817 B
DT kontroly			
Příčná zkouška tahem svarového spoje	T_1, \dots, T_n	EN ISO 4136	EN ISO 15 614-1
Podélná zkouška tahem svarového kovu	T_{SK}	EN ISO 5178	EN ISO 15 614-1
Zkouška lámavosti bočním ohybem	O_1, \dots, O_n	EN ISO 5173	EN ISO 15 614-1
Zkouška rázem v ohybu s ISO V-vrubem	KV_1, \dots, KV_n	EN ISO 148-1 EN ISO 9016	EN ISO 15 614-1, Materiálová specifikace
Zkouška makrostruktury a mikrostruktury	-	EN 17 639	EN ISO 5817 B
Zkouška tvrdosti	HV10	EN ISO 9015-1	EN ISO 15 614-1

Tab. 4 - Tyto hodnoty mechanických vlastností KSS musí být ověřeny

min. $R_{p0,2}$ [MPa]	max. R_m [MPa]	min. A_5 [%]	min. KV [J]
265	450-600	17	27 (-20°C)

Označení zkoušeného materiálu: S355J2+N, 1.0577 dle ČSN EN 10027-2.

6.1 Vizuální kontrola - VT

Vizuální kontrola svarového spoje byla provedena dle EN ISO 17 637 v rozsahu zkoušení 100%. Vyhodnocení proběhlo v souladu s EN ISO 5817 ve stupni hodnocení B.

6.2 Magnetická kontrola - MT

Zkouška na povrchové trhliny magnetickou metodou práškovou byla provedena dle EN ISO 17 638 v rozsahu zkoušení 100% a následně vyhodnocena dle EN ISO 5817 ve stupni hodnocení B. Podmínky zkoušení: <20lx, magnetizační proud 2,4-6,0 kA/m s UV osvětlením > 1000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

6.3 Ultrazvuková kontrola - UT

V souladu s EN ISO 17 640 byla provedena ultrazvuková zkouška se stanovením 100% rozsahu zkoušení a dle normy EN ISO 5817 vyhodnocena ve stupni hodnocení B. Podmínky zkoušení: UT použité sondy SWB45-2, SWB60-2 a SWB70-2.

6.4 Příčná zkouška tahem svarového spoje

Zkoušení příčným tahem svarového spoje bylo provedeno dle EN ISO 4136 v souladu s kritériem přípustnosti dle EN ISO 15 614-1, kdy dosažená hodnota R_m napříč svarovým spojem musí odpovídat hodnotám v tab. 4.

Naměřené hodnoty při zkoušce příčným tahem svarového spoje dle rozřezového plánu viz PŘÍLOHA B, jsou zobrazeny v tab. 5.

Tab. 5 - Výsledky příčné zkoušky tahem svarového spoje

Označení zkoušky	R_m [MPa]	Oblast porušení
T ₁	510	ZM
T ₂	497	ZM
T ₃	512	ZM
T ₄	518	ZM
T ₅	513	ZM
T ₆	516	ZM
T ₇	534	ZM
T ₈	525	ZM
T ₉	489	ZM
T ₁₀	537	ZM

6.5 Podélná zkouška tahem svarového kovu

Podélná zkouška tahem svarového kovu a základního materiálu byla provedena dle EN ISO 5178 v souladu s kritériem přípustnosti dle EN ISO 15 614-1, kdy dosažené hodnoty R_e , R_m a A_5 musí odpovídat hodnotám v tab. 4.

Naměřené hodnoty při podélné zkoušce tahem dle rozřezového plánu viz PŘÍLOHA B, jsou zobrazeny v tab. 6.

Tab. 6 - Hodnoty R_e , R_m a A při podélné zkoušce tahem

Označení zkoušky	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]
T_{SK}	411	515	24,0
T_{ZM}	291	509	24,3

6.6 Zkouška lámavosti

Zkouška lámavosti svarového spoje bočním ohybem byla provedena na čtyřech zkušebních tyčích dle EN ISO 5173. Průměr ohýbacího trnu 4. t a úhel ohybu stanoven dle EN ISO 15 614-1 pro materiály s $A > 20\%$ (S355J2+N, $A = 24,3\%$) musí při zkoušce dosáhnout 180° . Umístění zkušebních tyčí pro zkoušku lámavosti odpovídá PŘÍLOZE B.

6.7 Zkouška nárazové práce Charpy-V

Požadovaná hodnota nárazové práce ISO-V dle EN ISO 148-1 s umístěním vrubů podle EN ISO 9016 je min.27J při -20°C dle EN ISO 15 614-1. Odběr vzorků pro zkoušku nárazové práce KV svarového spoje byl proveden dle PŘÍLOHY B.

VWT 0/2

$$KV_1 = 149$$

$$KV_2 = 117$$

$$KV_3 = 135$$

VHT 1/2

$$KV_4 = 184$$

$$KV_5 = 170$$

$$KV_6 = 185$$

VWT 0/205

$$KV_7 = 111$$

$$KV_8 = 151$$

$$KV_9 = 107$$

VHT 1/205

$$KV_{10} = 197$$

$$KV_{11} = 177$$

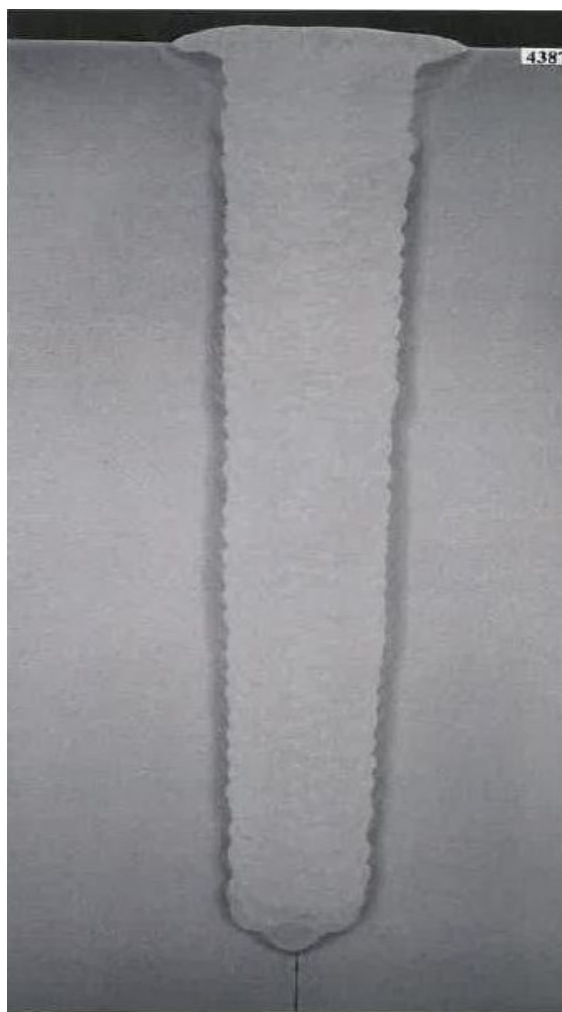
$$KV_{12} = 150$$

Vrubová houževnatost ISO-V 27J při -40°C, na vzorcích $KV_{13} \div KV_{24}$ byla dle PŘÍLOHY B zkoušena jen jako **INFORMATIVNÍ**. Naměřené hodnoty zde nejsou uvedeny.

6.8 Zkouška makrostruktury

Zkouška makrostruktury odebraná ze vzorků dle PŘÍLOHY B, byla provedena dle EN ISO 17 639 a vyhodnocena dle EN ISO 15 614-1, čl. 7.4.4, se stupněm hodnocení dle EN ISO 5817 B.

Po naleptání makrostruktury svarového spoje na obr. 9 můžeme pozorovat oba základní materiály, obě TOO a svarový kov. Pod kořenovou oblastí je patrná styčná plocha obou plechů, kde pozorujeme úpravu svarových ploch pro svařování na zámek, viz obr. 4. Tato oblast není zkouškami NDT hodnocena. TOO je v celém průřezu rovnoměrná, čímž je doloženo stejnoměrné a bezchybné nastavení svařovacích parametrů během celého procesu svařování KSS.

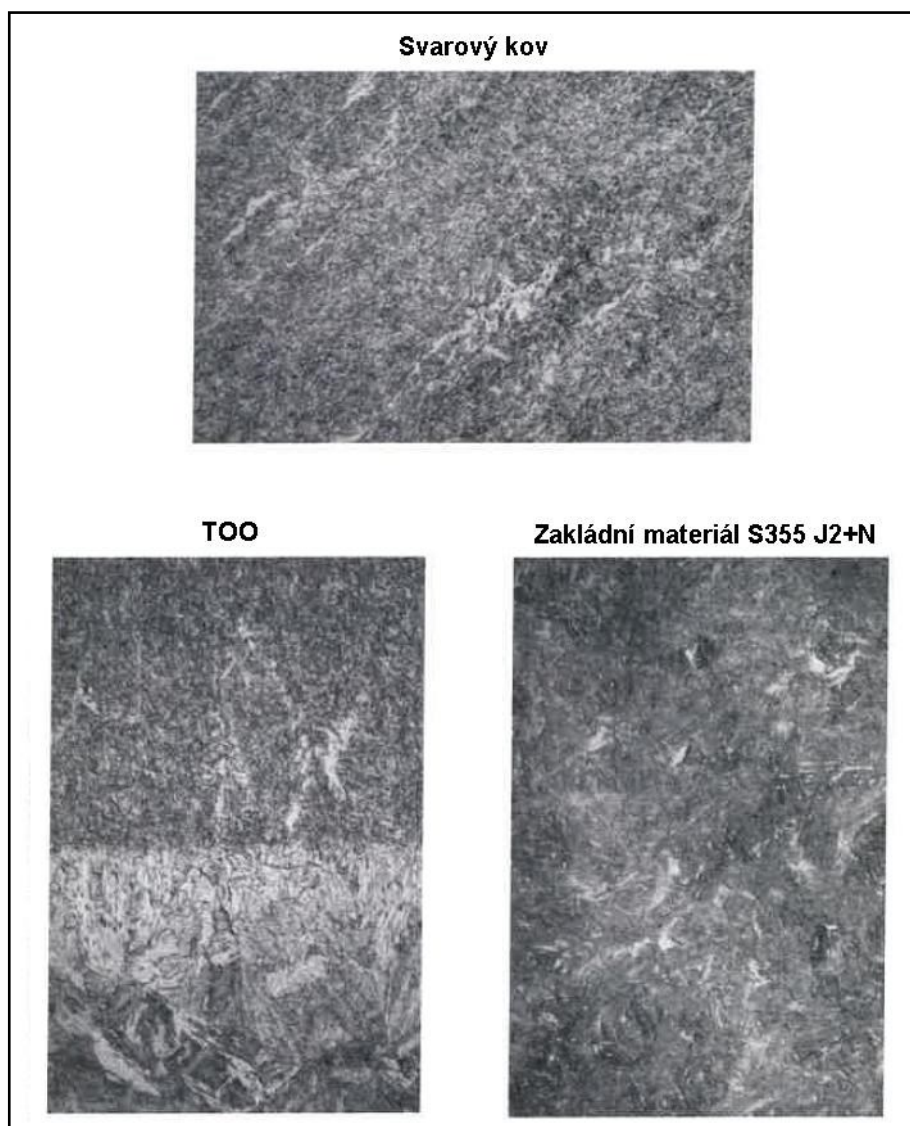


Obr. 10 - Vzorek makrostruktury (15% HNO_3), TOO max. 4 mm, zv. 9:10

6.9 Zkouška mikrostruktury

Zkouška makrostruktury odebraná ze vzorků dle PŘÍLOHY B, byla provedena dle EN ISO 17 639 se zvětšením 200:1 a se stupněm hodnocení dle EN ISO 5817 B.

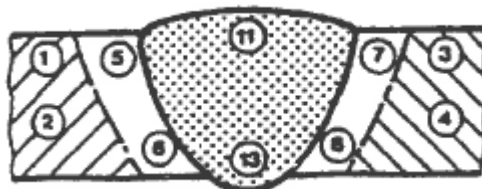
Po naleptání 4% HNO_3 byla obr. 10 zjištěna mikrostruktura tvořená převážně perlitem s menším množstvím feritu.



Obr. 11 - Vzorky mikrostruktury (4% HNO_3), zv. 200:1

6.10 Zkouška tvrdosti

Zkouška tvrdosti byla provedena dle EN ISO 9015-1. Dle vyhodnocení normou EN ISO 15 614-1, čl. 7.4.6, je maximálně přípustná hodnota 320HV10 – v žíhaném stavu oceli S355J2+N.



Obr. 12 - Umístění vzorků pro měření tvrdosti HV10

Tab. 7 - Naměřené hodnoty tvrdosti dle obr. 11

Č.měření	Oblast svarového spoje	Naměřené hodnoty
1	ZM	132,138,136
2	ZM	144,148,151
3	ZM	157,154,151
4	ZM	159,146,140
5	TOO	182,179,176
6	TOO	188,185,179
7	TOO	180,178,175
8	TOO	178,175,178
11	SK	147,142,145
13	SK	156,149,148
-	-	min. 132 max. 188

Z výsledků měření tvrdosti v tab. 7, je patrné zvýšení naměřených hodnot v oblasti pásma přehřátí a TOO svarového spoje v různých měřených tloušťkách svarového spoje. Zvýšení tvrdosti na max. 188 HV10 nemá vliv na svařitelnost oceli S355J2+N.

7 Vyhodnocení zkoušek kontrolního svarového spoje z materiálu S355J2+N

7.1 Nedestruktivní kontroly VT, MT a UT

Provedenou 100% vizuální kontrolou svarového spoje byl dle EN ISO 5817 B označen KSS jako vyhovující.

Na základě provedení vizuální kontroly následovalo 100% MT zkoušení s vyhovujícím výsledkem dle EN ISO 5817 B.

100% UT zkoušení třemi úhlovými sondami (45, 60 a 70°) neodhalilo žádné vnitřní vady svarového spoje a KSS byl označen dle EN ISO 5817 B za vyhovující.

Provedenými NDT kontrolami byl KSS plechu z materiálu S355J2+N označen jako vyhovující.

7.2 Destruktivní kontroly

Zkouškami tahem napříč svarového spoje byly zjištěny hodnoty $R_m = 489 - 537$ MPa a stanoveno místo lomu v základním materiálu. Dosažené hodnoty potvrzují vyhovující pevnost svarového spoje dle EN ISO 15 614-1.

Při podélné zkoušce tahem byly ověřeny hodnoty svarového kovu $R_{p0,2SK} = 411$ MPa, $R_{mSK} = 515$ MPa a $A_{5SK} = 24,0\%$ a základního materiálu S355J2+N $R_{p0,2ZM} = 291$ MPa, $R_{mZM} = 509$ MPa a $A_{5ZM} = 24,3\%$.

Dosažené hodnoty destruktivních zkoušek podélným tahem vyhovují požadavkům na mechanické vlastnosti svarového kovu a základního materiálu dle EN ISO 15 614-1. Odolnost proti vnitřním a vnějším silám díky vysoké pevnosti R_m zůstává zachována.

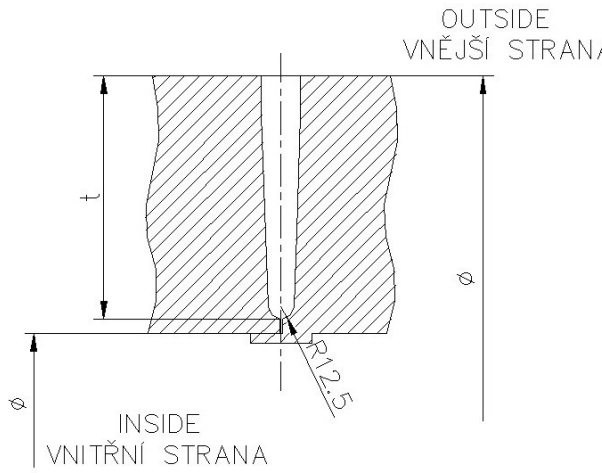
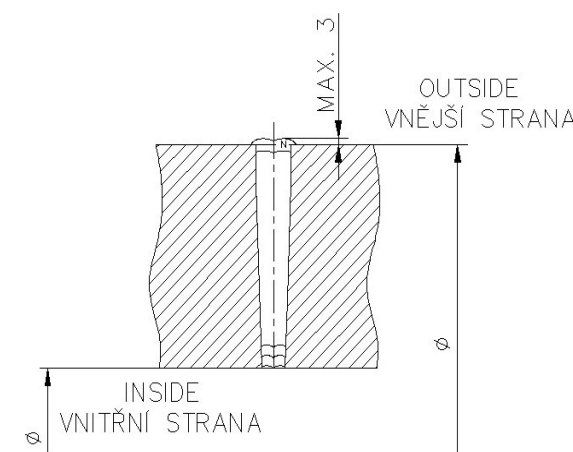
Hodnoty nárazové práce min. 27J při -20°C byly dle EN ISO 15 614-1 ověřeny s vyhovujícími výsledky. Nárazová práce dosahuje ve svarovém kovu KV = 107-151J a v oblasti 1 mm od hranice ztavení KV = 150-197J. S naměřených hodnot nárazové práce vyplývá zvýšení hodnot v oblasti pásma přehřátí a TOO svarového spoje.

Vzorek makrostruktury svarového spoje po naleptání 15% kyselinou dusičnou nevykazoval dle EN ISO 5817 B žádné nepřipustné vady.

Zkouška mikrostruktury základního dle EN ISO 17 639 prokázala perliticko-feritickou mikrostrukturu oceli S355J2+N.

Měřením tvrdosti byly dle EN ISO 15 614-1 prokázány vyhovující hodnoty ve všech oblastech svarového spoje oceli S355J2+N. Mírné zvýšení tvrdosti v obou TOO na hodnoty okolo 180 HV10 nemá vliv na svařitelnost materiálu.

Na základě provedení a vyhovujícího vyhodnocení kompletního rozsahu zkoušení kontrolního svarového spoje byla vytvořena WPS (str. 30 - 31) pro konkrétní svarový spoj tlačných sloupů na plechu P400 z materiálu S355J2+N.

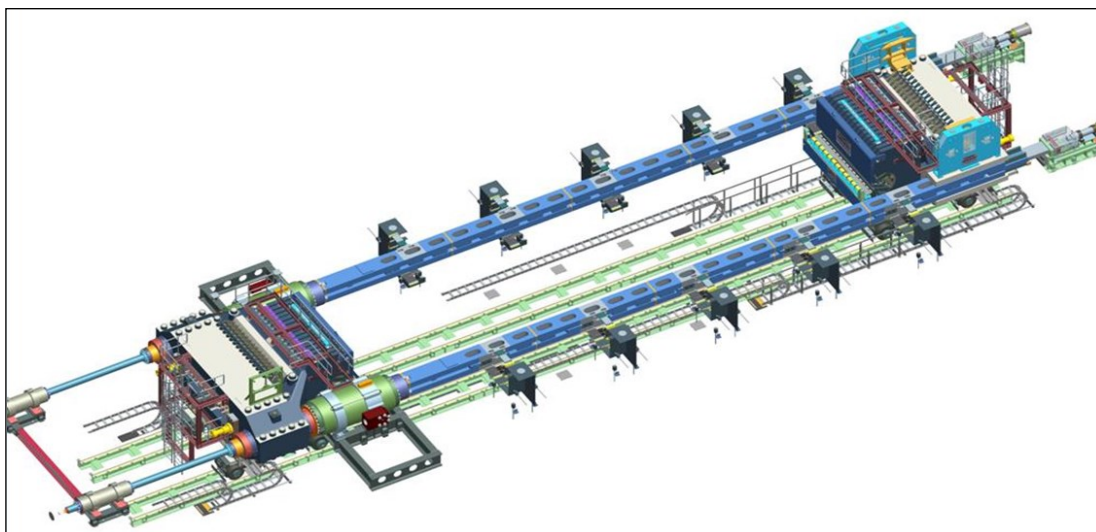
SPECIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ WPS <i>WELDING PROCEDURE SPECIFICATION WPS</i> EN ISO 15 609-1			Číslo WPS	051/15 rev.0
			Číslo WPQR	---
			Strana	1/2
			Kvalifikace postupu dle:	EN ISO 15 614-1
Místo	Ostrava	Datum:	3.3.2016	
Postup svařování výrobce	---	Vrubová houževnatost kvalifikována	-20°C	
SPECIFIKAČE ZÁKLADNÍCH MATERIÁLŮ				
Skupina dle EN ISO 15 608	Skupina 1 + 1			
Označení materiálu – podmínky	S355J2+N dle DIN EN 10 025-2			
Tloušťka materiálu „t“ [mm]	50 ÷ 500	Max. tloušťka svar. kovu [mm]	A+B) 50 - 440	
Vnější průměr [mm]	> 500			
SVAŘOVACÍ PODMÍNKY				
Typ spoje	Typý - oboustranný	Poloha svařování dle EN ISO 6947	PA	
Svařovací proces dle EN ISO 4063	A+B) 121 (SAW)	Stehování, přípravky *5)	---	
Způsob přípravy úkosu, čištění, svarové hrany	Strojní opracování nebo pálení s přebroušením; Čištění od mastnoty, vlhkosti, barvy, okují, rzi a jiných nečistot broušením nebo ocelovým kartáčem nebo odmašťovacími prostředkem. Kartáčování min.20mm po obou stranách.			
Čištění během svařování	Kartáčování nebo broušení dokud všechna struska, roztřík a další zjištěné vady neodstraněny.			
Metoda odstraňování kořene *1)	Strojní opracování.			
NÁČRT		SLED SVAŘOVÁNÍ		
				
Ochranný plyn/tavidlo – ochrana svaru	---	Jedna elektroda/více elektrod	Jedna elektroda	
Ochranný plyn/tavidlo – ochrana kořene	---	Vzdálenost napájecího průvlatku od pracovního úkosu	20-25mm	
Oscilace (amplituda, doba výdrže)	---	Odstranění kořene	ANO	
Rozkyv	Bez rozkyvu	Jeden nebo více průchodů	Více průchodů	

Číslo WPS		051/15 rev.0				Strana 2/2					
PŘÍDAVNÝ MATERIÁL											
Index		Označení				Zařazení					
A		Union S3Si				S3Si1 EN 756					
B		Böhler UV 418 TT				SA FB 1 55 AC H5 EN 760					
C		---				---					
D		---				---					
PARAMETRY SVAŘOVÁNÍ											
Pořadí <i>I-kořen</i> <i>II-výplň</i> <i>III-krycí</i>	Číslo housenky	Index příd. mat.	Průměr elektrody [mm]	Svař. proces	Svař. proud [A]	Svař. napětí [V]	Typ proudu/ polarita *8)	Rychlost svařování [cm/min]	Poloha svařování	Tepelný příkon [kJ /cm]	
I	1	A+B	4	121	400-550	28-30	ss/+	min.40	PA,PB	19-24	
II,III	2÷N	A+B	4	121	500-650	28-30	ss/+	min.40	PA,PB	24-30	
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ											
Předehřev				Interpass teplota				Dohřev *6)			
min. 200 °C				max. 280 °C				250-280°C, min.4 hod.			
Žíhání na snížení vnitřního pnutí v souladu s EN standardy (např. EN 12 952, EN 13 445...) a WPQR									ANO		
Rychlost ohřevu				Teplota/Výdrž				Rychlost ochlazování			
50 °C/ hod				560 ÷ 580°C *7 / 7-8 hod				50 °C/ hod			
Poznámky:											
*1) Platí pouze pro tupé svary / It is valid for groove welds only.											
*2) Max. kořenová mezera koutových spojů (0,5+0,1a), ale max. 2 mm („a“ je velikost koutového spoje)											
*3) Tvar, přesné rozměry svarové hrany dle příslušného výkresu.											
*4) Doporučená hodnota předrazu elektrody pro obvodové svary dle průměru (uvnitř, vně) 0 ÷ 80mm											
*5) Stehy v délce 70-100 mm. Stehovat ruční metodou svařování 135. Stehy nejsou součástí svaru.											
*6) Nad tloušťku t > 50 mm použít max. výdrž											
*7) Viz předpis PWHT											
*8) ss - stejnosměrný proud / DC; st - střídavý proud / AC											
*9) ---											
*10) ---											
DALŠÍ INFORMACE											
Výrobce:						Zkušební orgán nebo zkušebna					
Jméno:						Jméno:					
Datum:						Datum:					

8 Svařování tlačných sloupů P400 dle DTSP

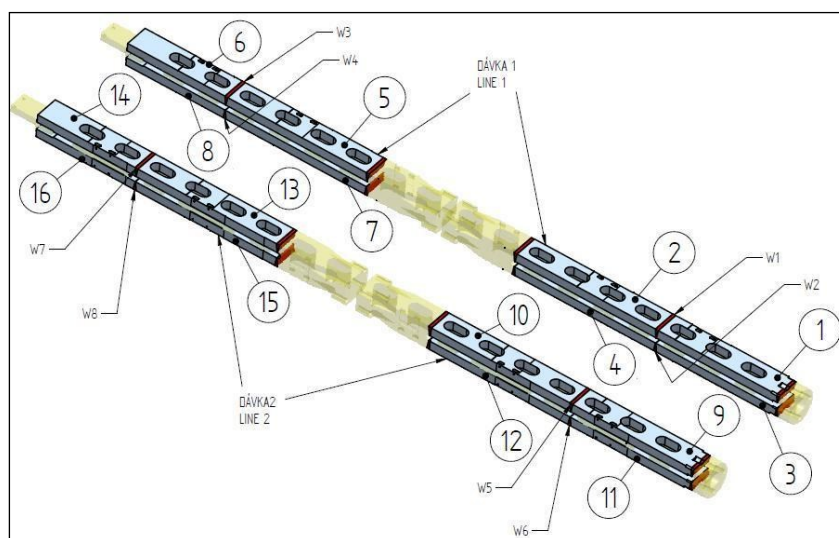
8.1 Popis tlačných sloupů P400

DTSP v PŘÍLOZE A byl vytvořen pro svařování segmentů tlačných sloupů P400 napínacího lisu. Na obr. 12 je znázorněn model napínacího lisu 120 MN, který kromě jiných komponent tvoří dva tlačné sloupy s oválnými otvory, sloužící jako vodící a tlačné prvky pro napínací zařízení a jsou svařeny z šestnácti segmentů tloušťky 400 mm.



Obr. 13 - Napínací lis 120MN

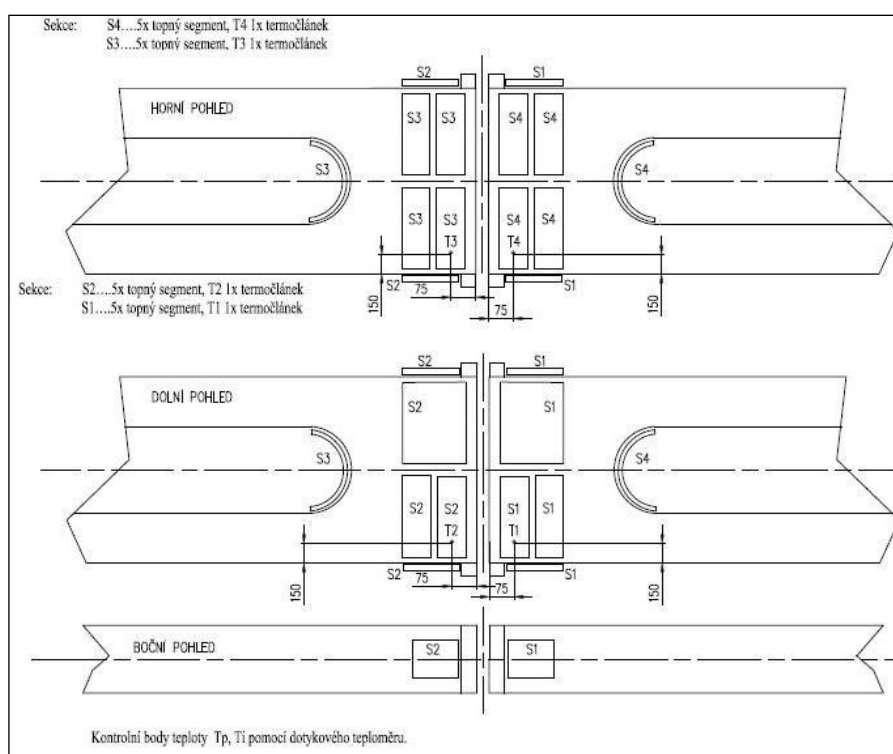
Těchto šestnáct segmentů na obr. 13, je vyrobeno ze zatepla válcovaných plechů P400 jemnozrnné mikrolegované oceli S355J2+N. Oba tlačné sloupy jsou namáhány převážně tlakem a jen výjimečně se v nich generují tahová napětí.



Obr. 14 - Schéma tlačných sloupů ze segmentů P400 č. 1 až 16

8.2 Předehřev svarových spojů

Předehřev svarového spoje plechu P400 na obr. 14 se prováděl pomocí elektrických odporových článků. Jednotlivé topné elementy - dečky jsou elektricky spojeny do sekcí, které jsou samostatně říditelné. Počet sekcí je dán kapacitou zdroje ohřevu a požadavkem na homogenitu tepelného pole. A tato homogenita je zajištěna vhodným rozmístěním sekcí (S1,2,3,4). Počet řídicích termočlánků musí odpovídat počtu sekcí. Požadavek na výši teploty předehřevu se nastaví přímo na zdroji zajišťující předehřev. Teplota předehřevu je dána dle příslušné WPS. V tomto konkrétním případě je předehřev svarového spoje plechů P400 min. 200°C.



Obr. 15 - Schéma obložení místa svarového spoje topnými dečkami na plechu P400

8.3 Svařování segmentů tlačného sloupu

Detailní pohled na samotné svařování segmentů tlačného sloupu, které metodou svařování 121 do úzkého úkosu. Popis svařovacího zařízení je uveden v kapitole 4.1 a na obr. 3 a 4. Na aktuálním snímku obr. 15, je zobrazen detail svarového spoje plechu P400 tlačného sloupu č.1 – line 1. Svařováním z obou stran dochází k eliminaci úhlové deformace svařence. Svarová hlava je dle aktuálního snímku umístěna v hloubce 275 mm v oblasti těsně nad kořenovou vrstvou. Po obou bocích jsou instalovány tepelné izolace okolního základního materiálu, zabraňující tepelným ztrátám v průběhu náhřevu a svařování.



Obr. 16 - Oboustranné svařování do úzkého úkosu plechů P400

8.4 Závěrečná montáž

Po svaření jednotlivých segmentů se na montáži provedla zkušební kompletace všech částí tlačného sloupu, viz obr 16. Celková váha břemene dosahuje 180 tun.



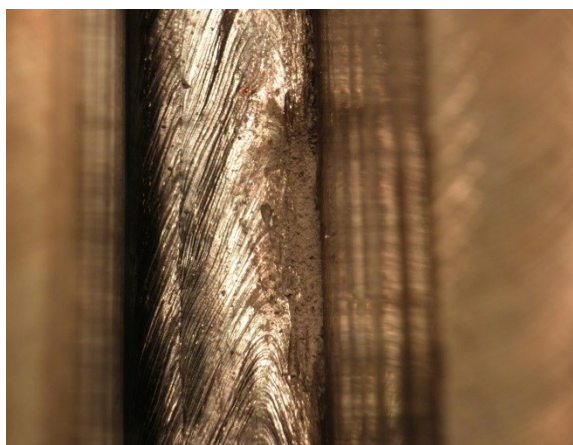
Obr. 17 - Tlačný sloup č.1- line 1 po kompletaci na montáž

9 Vadné oblasti ve svarových spojích při skutečném svařování plechů P400

9.1 Fotodokumentace z průběhu svařování plechů P400

Při procesu svařování plechů P400 z materiálu S355J2+N došlo u několika svarových spojů tlačných sloupů k nežádoucím metalurgickým dějům ve svarové lázni, jejíž příčiny se staly předmětem detailnější analýzy.

Na obr. 17 je zdokumentován pohled do úzkého úkosu svarového spoje a místo se zřetelně nevyhovujícím vzhledem povrchu svaru.



Obr. 18 - Špatná tvorba svarové lázně během svařování



Obr. 19 - Vymrštěný útvar ze svarové lázně

Během svařování došlo k reakci tavné lázně s nečistotami a k „vymrštění“ svarového kovu z roztavené svarové lázně mimo svařovanou oblast, obr. 18.

Po mechanickém odstranění vadné oblasti navařeného materiálu, byla odhalena korozí napadená dutina (kaverna) na svarové hraně, obr. 19.

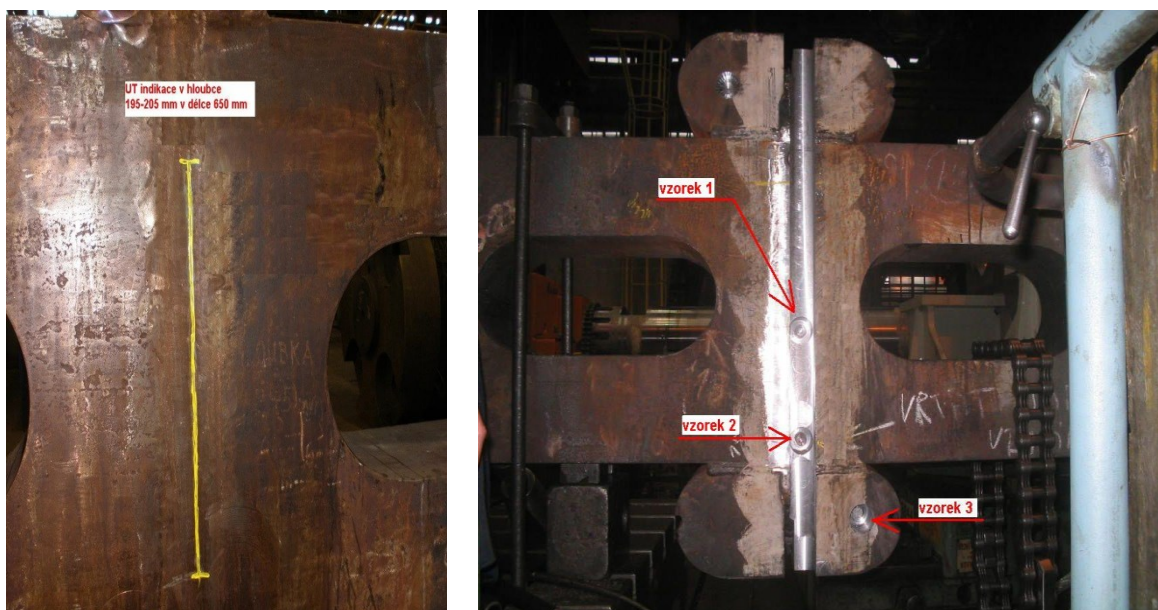


Obr. 20 - Korozí napadená místa na svarové ploše odkrytá v průběhu svařování

9.2 Analýza příčin porušení plechů P400

Pro prokázání příčin porušení celistvosti svarového spoje byla provedena analýza tří vzorků vývrtů z plechu P400 z oceli S355J2+N, viz obr. 20.

Vzorek 1 odebrán z oblasti svarového spoje s lomovou plochou přes celý průřez vývrtu, **vzorek 2** z oblasti základního materiálu a částečně tepelně ovlivněné oblasti s detekovanou trhlinou a **vzorek 3** ze základního materiálu. Detail místa vývrtu ve svarovém spoji je zobrazen na obr. 21.



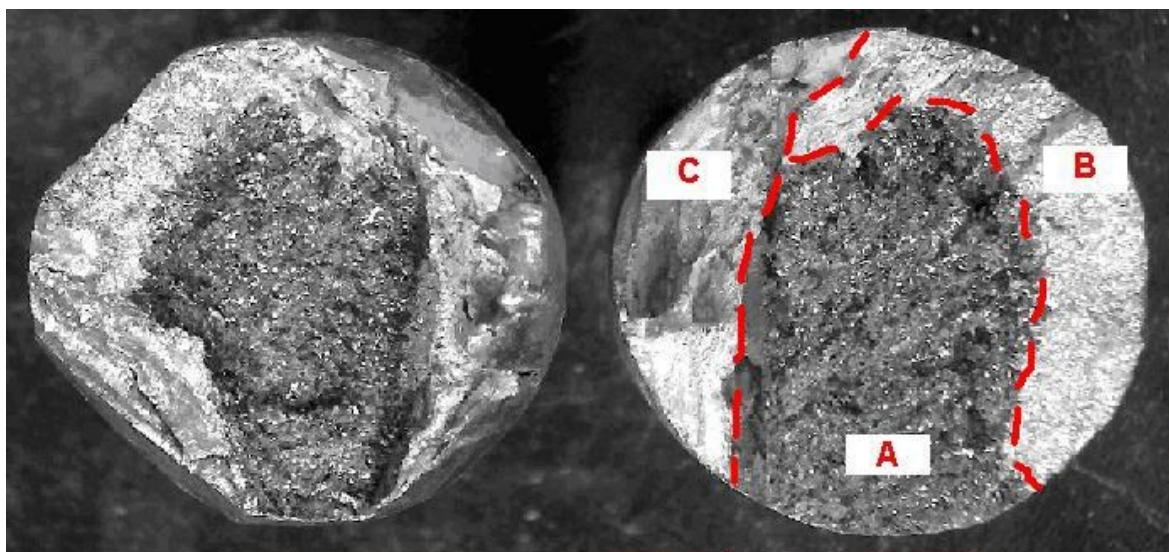
Obr. 21 - Označení oblasti UT indikace a míst odběrů vzorků 1, 2 a 3 z plech P400



Obr. 22 - Detailní zobrazení místa vývrtu vzorku 2

9.3 Výsledková část

Celkový vzhled všech tří vývrtů vzorků je uveden na obr. 22 až 24. Na obr. 22 je zvětšen vzorek 1 s patrným rozdělením lomové plochy na tři hodnocené oblasti, které jsou označeny písmeny A, B, C. V případě oblasti A lze předpokládat, že se jedná o trhlinu přítomnou v plechu P400 během svařování, oblast B reprezentuje dolomení a oblast C odpovídá svarovému kovu.



Obr. 23 - Vzorek 1, zv. 2, 4x



Obr. 24 - Detail vzorků 2 a 3, zv. 1, 1x



Obr. 25 - Vzorek 2, zv. 1, 7x

9.4 Kontrolní rozbor chemického složení

Pro kontrolní rozbor chemického složení byl odebrán materiál z podpovrchové oblasti 0 – 80 mm vzorku 2 a z oblasti trhliny vzorku 1 přibližně 130 - 230 mm od povrchu plechu. Výsledky kontrolního chemického rozboru jsou uvedeny v tab. 8.

Tab. 8 - Výsledky chemického rozboru v hm. %

	C	Mn		Si	P	S	Cr	Mo
atest materiálu*)	0,184	1,467		0,437	0,016	0,016	0,044	0,004
vzorek 2	0,198	1,474		0,391	0,017	0,019	0,047	0,011
vzorek 1	0,332	1,631		0,402	0,031	0,018	0,031	0,017
Povolené hodnoty dle ČSN EN 10 025-2	0,24	1,70		-	0,035	0,035	-	-
	V	Ni	Cu	Ti	Al rozpustný	Al vázaný	Al celkový	Nb
atest materiálu*)	0,005	0,037	0,026	0,003	-	-	0,034	0,001
vzorek 2	<0,01	0,04	0,02	<0,01	0,034	0,002	0,036	<0,01
vzorek 1	<0,01	0,03	0,02	<0,01	0,042	0,001	0,043	<0,01
Povolené hodnoty dle ČSN EN 10 025-2	0,1	-	0,60	0,15	min. 0,015			0,04

Pozn:*).....atest plechu P400 z oceli S355J2+N.

Z výsledků chemického rozboru v tab. 8 vyplývá rozdílné chemické složení v obsazích uhlíku, manganu a fosforu mezi povrchovou oblastí a střední částí plech P400 tloušťky 400 mm. V případě obsahu uhlíku došlo k překročení maximální povolené hranici obsahu tohoto prvku a téměř k dvojnásobnému nárůstu hodnot mezi povrchem a středovou částí plechu, což svědčí o velké chemické heterogenitě materiálu.

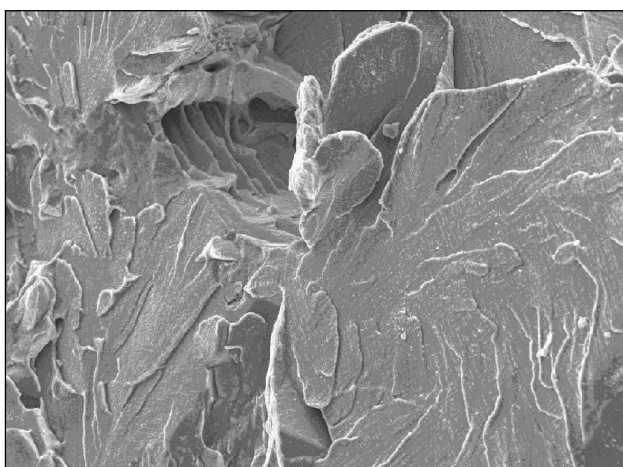
9.5 Fraktografický rozbor

Fraktografický rozbor povrchu trhliny byl proveden na řádkovacím elektronovém mikroskopu JEOL JSM 5510. Lokální chemické složení nekovových částic přítomných na lomové ploše bylo studováno za použití elektronového mikroanalýzátoru JCXA-733.

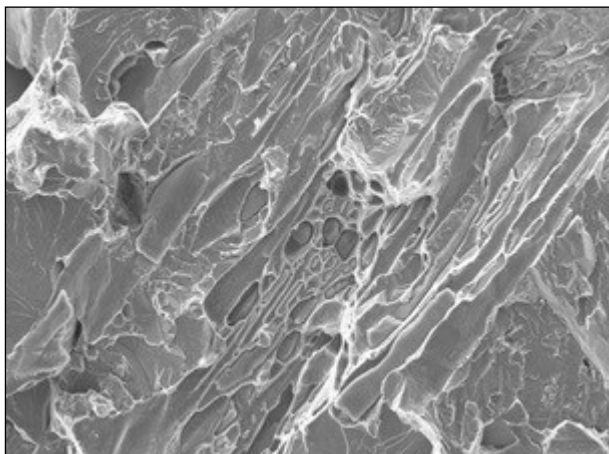
Oblast A vzorku 1 byla pokryta slabou vrstvou oxidického povlaku, který je dokumentován na obr. 25. Tato oblast je tvořena lomovým mechanismem transkrystalického štěpného porušení s morfologií říčkových fazet na obr. 26. Detailním mikrofraktografickým rozbohem oblasti B vzorku 1 bylo zjištěno, že lomová plocha byla také tvořena transkrystalickým štěpným porušením s typickou dokonale prokreslenou říčkovou kresbou, obr. 27. Na obr. 28 jsou dokumentovány typické příklady nekovových částic, které se nacházely v této oblasti. Oblast C vzorku 1 byla tvořena transkrystalickým tvárným - houževnatým porušením s morfologií různorodých jamek. Rovněž bylo pozorováno velké množství mechanických otlaků, které vznikly při odvrtávání vzorku 1, obr. 29, 30. Z obr. 29 je zřejmé, že v některých jamkách se vyskytovaly nekovové částice kulovitěho tvaru. Lze předpokládat, že oblast s transkrystalickým tvárným porušením svarového spoje je materiál svarového kovu, z něhož byl vzorek 1 odebrán.

Tento předpoklad byl potvrzen následným metalografickým rozbohem mikrostruktury.

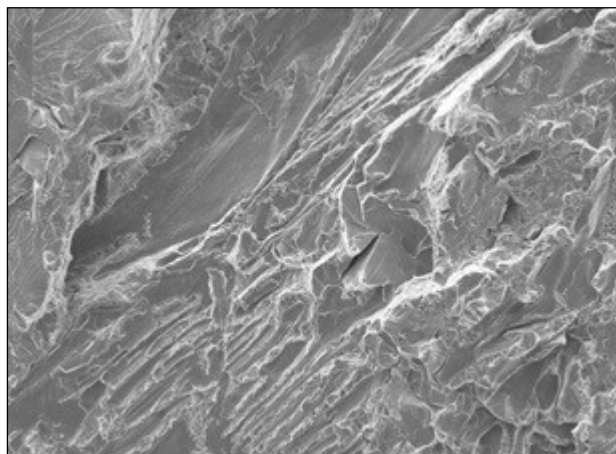
Zjištěné nekovové částice byly podrobeny rtg spektrální mikroanalýze. Při studiu chemického složení těchto nekovových částic bylo zjištěno, že se jedná o sulfidy manganu, obr. 31.



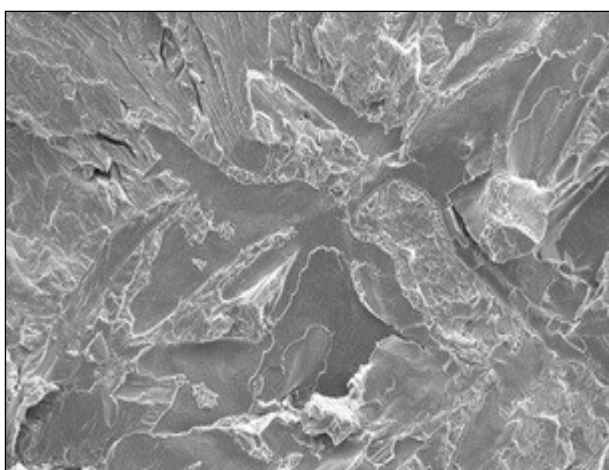
Obr. 26 - Oxidický povlak, oblast A, zv. 800x



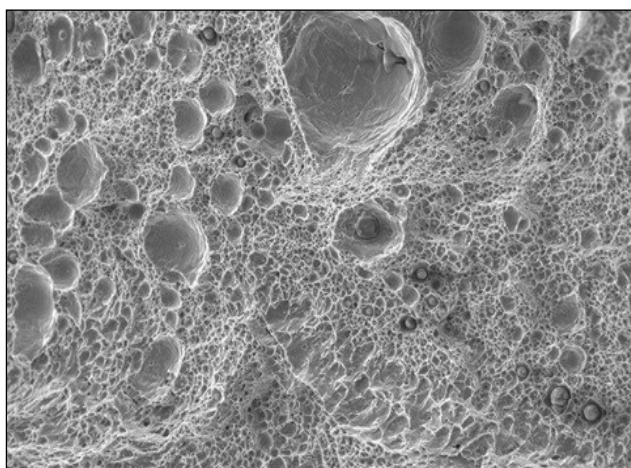
Obr. 27 - Štěpné porušení, oblast A, zv. 400x



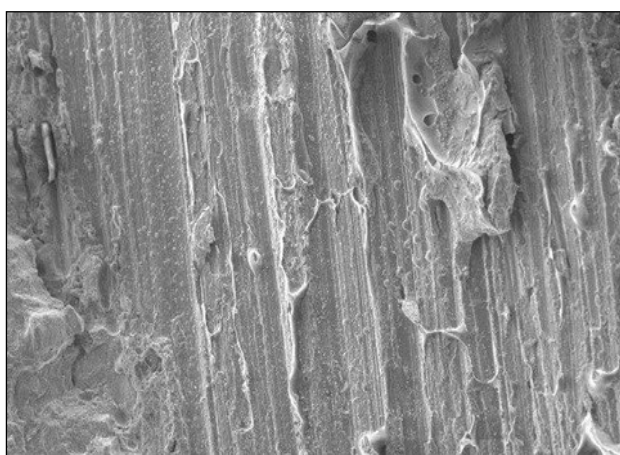
Obr. 28 - Říčková kresba, oblast B, zv. 250x



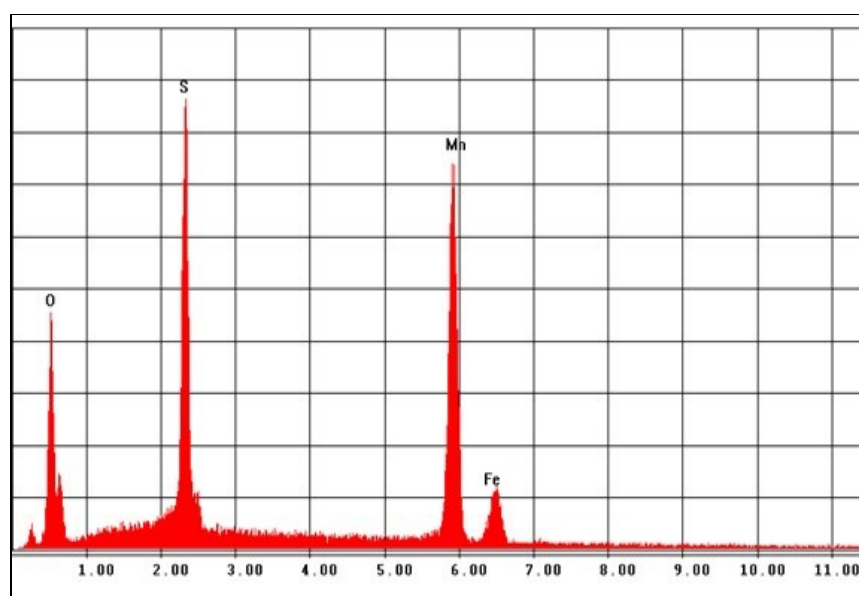
Obr. 29- Nekovové částice, oblast B, zv. 300x



Obr. 30 - Morfologie jamek, oblast C, zv. 600x



Obr. 31 - Otlaky od vrtání, oblast C, zv. 130x



Obr. 32 - Rtg spektrální mikroanalýza s přítomností sulfidů manganu ve vzorku 1

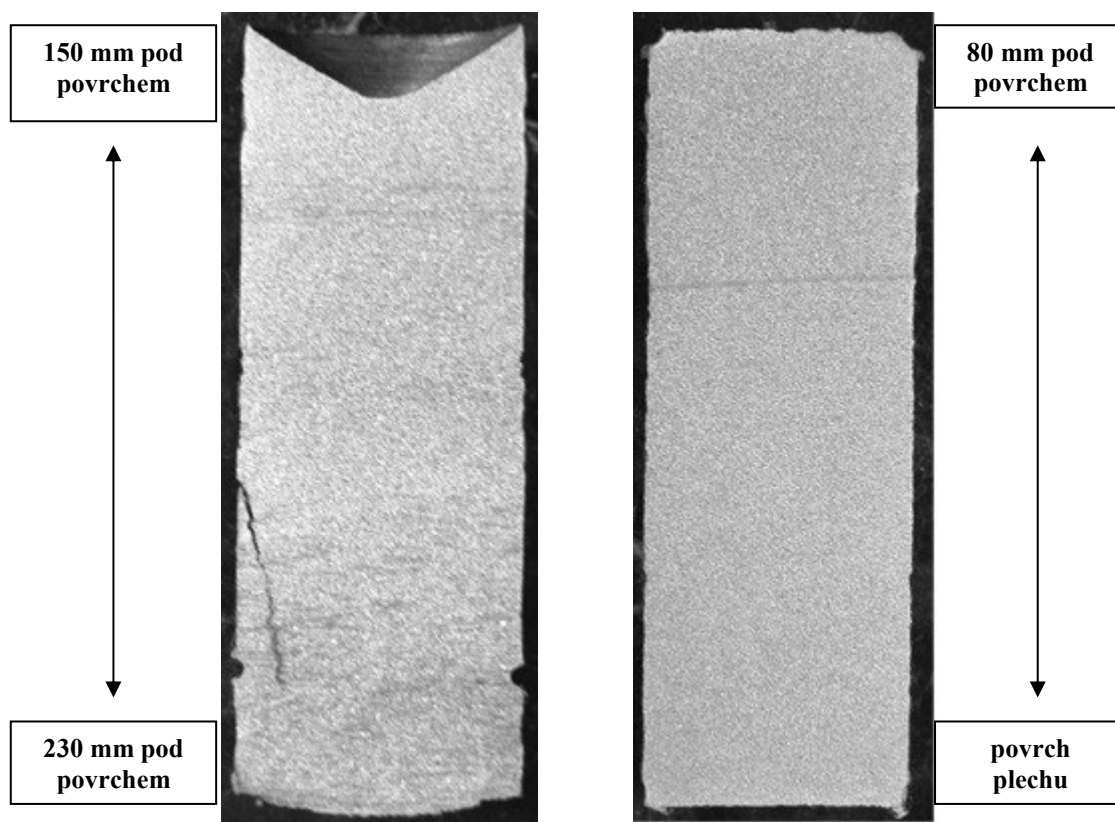
9.6 Metalografický rozbor

U odebraných vzorků byl dále proveden metalografický rozbor makro a mikrostruktury.

9.6.1 Makrostruktura

Makrostruktura vzorků byla zviditelněna v roztoku 10% HNO_3 . Vzorek 1 odebraný cca 150 až 230 mm pod povrchem vykazoval heterogenní makrostrukturu, a to zejména ve spodní části vzorku, kde byly zjištěny trhliny přibližně kolmé ke směru tváření materiálu, obr. 32. Na řezu vzorku 1 byly pozorovány výraznější vycezeniny.

Na obr. 33 je dokumentována makrostruktura základního materiálu vzorku 3 odebraného od povrchu plechu do hloubky cca 80 mm. Struktura základního materiálu v uvedené oblasti byla převážně homogenní, přibližně v 60 mm pod povrchem byla pozorována nevýrazná vycezenina.



Obr. 33 - Vzorek 1, zv. 1, 6x

Obr. 34 - Vzorek 3, zv. 1, 6x

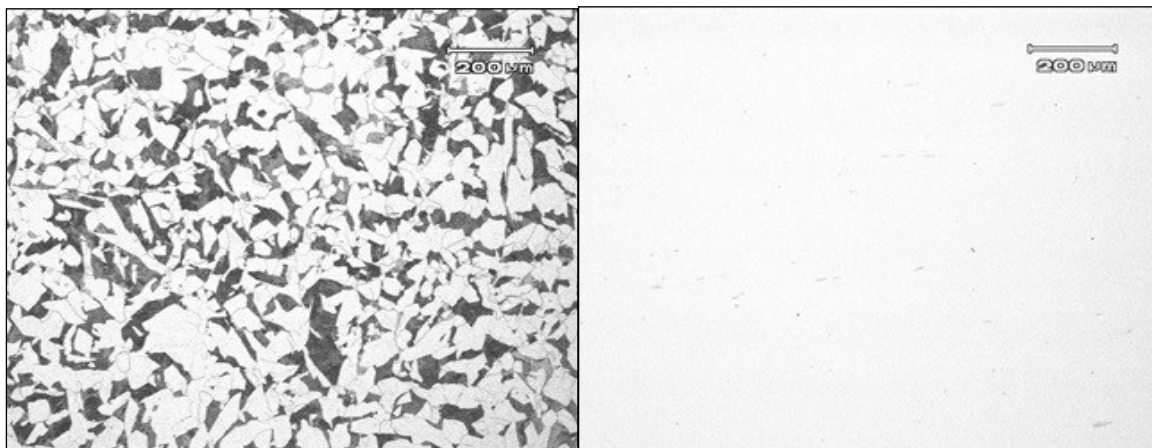
9.6.2 Mikrostruktura

Ve vyleštěném stavu byly v základním materiálu vzorku 2 pozorovány četné přetvářené sirníkové inkluze, často vyloučené v eutektickém uspořádání, obr. 34. Po naleptání 4% Nitalem byla zjištěna mikrostruktura tvořená převážně perlitem s menším množstvím feritu.



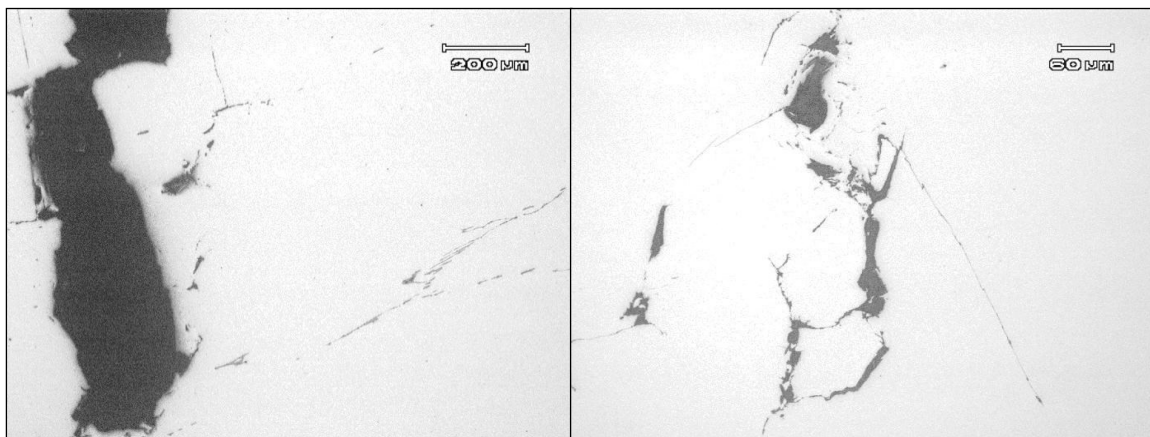
Obr. 35 - Vzorek 2

U vzorku 3 byly ve vyleštěném stavu pozorovány drobné protvářené sirníkové vměstky, obr. 35. Po naleptání 4% Nitalem byla pozorována mikrostruktura tvořená směsí feritu a perlitu.



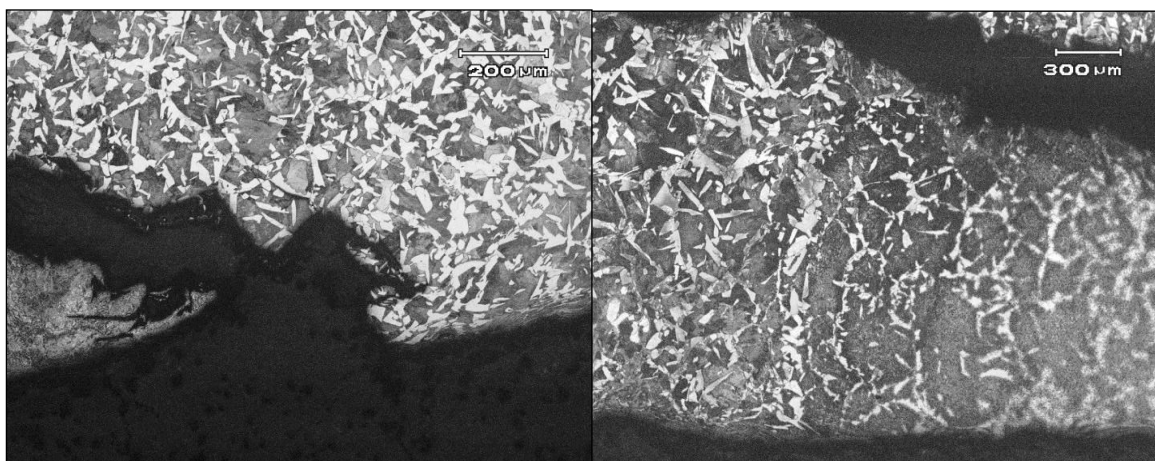
Obr. 36 - Vzorek 3

Na obr. 36 je dokumentována částečně propojená trhlina vzorku 2. V okolí této trhliny bylo pozorováno velké množství jemných trhlín „ napětového charakteru “. Sírnikové vměstky v okolí trhliny byly orientovány převážně ve směru rovnoběžném se směrem tváření materiálu.



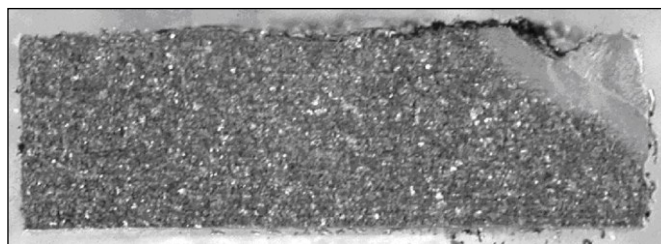
Obr. 37 - Vzorek 2

Zjištěná trhlina se šířila základním materiálem, a částečně rozhraním základního materiálu a tepelně ovlivněné oblasti, obr. 37.



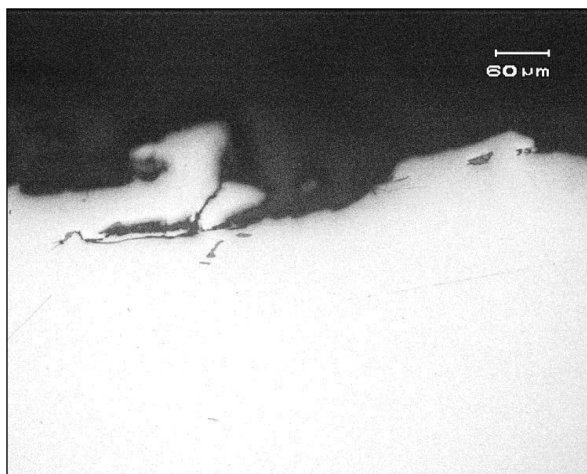
Obr. 38 - Vzorek 2

Celkový pohled na vzorek 1 s lomovou plochou přes celý průřez vývrtu, je dokumentován na obr. 38.

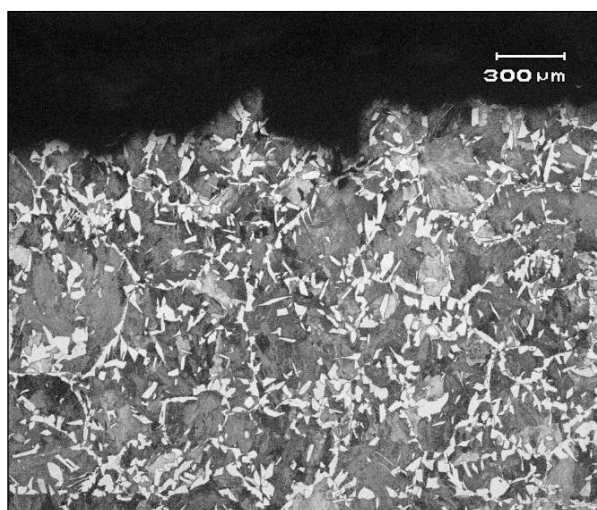


Obr. 39 - Lomová plocha vzorku 1

Pod lomovou čarou bylo pozorováno velké množství natrženin napěťového charakteru, obr. 39, rovněž byly zaznamenány sirníkové inkluze. Po naleptání ve 4% Nitalu byla mikrostruktura základního materiálu obdobná jako v případě vzorku 2, obr. 40.



Obr. 40 - Trhliny napěťového charakteru v okolí lomové plochy



Obr. 41 - Mikrostruktura vzorku 1 v okolí lomové plochy

9.7 Výsledné zhodnocení detailní analýzy

Z výsledků analýzy příčin porušení celistvosti několika svarových spojů plechů P400 a provedených rozborů vyplynulo, že studovaný materiál, za tepla válcovaný plech, vykazoval výraznou chemickou heterogenitu napříč tloušťkou, přičemž obsah uhlíku v oblasti středu (cca 200 mm) tloušťky plechu byl téměř dvojnásobný při srovnání s obsahem uhlíku v podpovrchové oblasti.

Fraktografickým rozbořem trhliny, která byla detekována při ultrazvukové kontrole svarového spoje, bylo zjištěno, že mechanismus porušení základního materiálu má charakter křehkého transkrystalického štěpení s morfologií říčkových fazet. Na lomové ploše byla pozorována přítomnost četných oblastí s výskytem nekovových částic. Tyto částice byly rtg spektrální analýzou prokázány jako sulfidy manganu. V oblasti svarového kovu vzorku 1, mělo porušení transkrystalický tvárný charakter. Ze zabarvení povrchu trhliny lze usuzovat, že trhlina byla v materiálu přítomna během svařování.

Metalografickým rozbořem byly zjištěny výrazné vycezeniny v oblastech středu tloušťky plechu. Četné nekovové inkluze byly pozorovány jak v oblastech bez výskytu trhlín, tak v jejich blízkosti. V oblasti středu tloušťky, a v blízkosti trhlín byla struktura tvořená perlitem s menším množstvím feritu. Tento strukturní stav se vyznačuje zmenšenou úrovní houževnatosti a poklesem plastických vlastností.

Na základě uvedených shrnutí lze konstatovat, že trhlina souvisí s metalurgickou kvalitou plechu a v materiálu byla již před svařováním. Trhliny orientované kolmo ke směru tváření plechu, pravděpodobně vznikly v důsledku vnitřních pnutí generovaných při svařování. I zde jsou vzniklé trhliny spoje se znaky metalurgických nečistot.

10 Způsob opravy vadných oblastí svarového spoje tlačných sloupů

Postup opravy byl rozdělen do následujících bodů:

1. Mechanicky odstranit vadnou oblast 15 mm od hranice: svar – základní materiál.
2. Na povrchu, který bude navařován provést NDT kontroly:
 - VT povrchu základního materiálu podle normy EN ISO 17 637, vyhodnocení podle EN ISO 5817 ve stupni B.
 - PT povrchu základního materiálu podle normy EN ISO 3452-1, vyhodnocení podle EN ISO 23 277 ve stupni B.
 - UT kontrolu základního materiálu do vzdálenosti min. 25mm od řezné plochy, kontrolu provést podle normy EN ISO 17 640, vyhodnocení provést podle normy EN ISO 11 666 ve stupni B.
3. Po vyhovujícím vyhodnocení NDT pokračovat v těchto krocích:
 - opracovat plochy do vzdálenosti min. 20 mm od řezné hrany, kovově čistý povrch
 - nainstalovat elektrické odporové topné dečky pro předehřev návaru
 - přivařit tři řídicí termočlánky, řídicí termočlánky zároveň kontrolní
 - zaizolovat navařovaná plochy do vzdálenosti 800 mm z obou stran
 - zapojit řídicí a kontrolní termočlánky
 - teplota předehřevu min. 150°C, rychlost ohřevu max. 50°C/hod
 - teplota interpass max. 250°C
4. Metodou ručního obloukového svařování elektrodou OK 48.00 navařit návar v kritické oblasti o tloušťce 25 mm.
5. Následuje opracování povrchu návaru frézováním s následnými NDT kontrolami.
6. NDT kontroly po navaření:
 - VT, PT a UT: provedení a vyhodnocení dle bodu 2

11 Závěr

V rámci diplomové práce byla provedena studie charakteristických vlastností oceli S355J2+N s orientací na plechy tloušťky až 400 mm.

Problematika svařování tlustostěnných materiálů spočívá v schopnosti ověření užitných vlastností svarového spoje. Ověření užitných vlastností svarového spoje bylo provedeno na KSS tloušťky 250 mm z materiálu S355J2+N. Postup svařování byl kvalifikován dle EN ISO 15 614-1 s rozsahem zkoušení stanoveným v rozřezového plánu pro KSS a s vyhodnocením dle EN ISO 5817 ve stupni přípustnosti B. Zkoušky ověřující užité vlastnosti kontrolního svarového spoje se uskutečnily bez komplikací při jejich provádění a s celkovými vyhovujícími výsledky destruktivního a nedestruktivního zkoušení. Byla ověřena vhodnost zvolené metody svařování 121 do úzké mezery pro provedení svarového spoje tlačných sloupů tloušťky 400 mm plechů P400 z materiálu S355J2+N.

Na základě ověření užitných vlastností KSS byla vytvořena WPS pro svařování plechů P400 tloušťky 400 mm tlačného sloupu napínacího lisu 120 MN. Během svařování dle DTSP, došlo u několika svarových spojů k nežádoucím metalurgickým procesům v roztaveném svarovém kovu. Vzhledem k četnosti a místu výskytu indikací v podélné ose plechu přibližně 200 mm pod povrchem, byla provedena detailní analýza tří vzorků odebraných z plechu P400, zkoumající příčiny vzniku těchto necelistvostí.

Detailní analýzou byla prokázána výrazná chemická heterogenita obsahu uhlíku, manganu a fosforu napříč tloušťkou plechu P400. Na lomové ploše trhliny vzorku 1, byla pozorována přítomnost četných oblastí s výskytem nekovových částic. Tyto částice byly rtg spektrální analýzou prokázány jako sulfidy manganu. Na základě studia charakteristiky porušení svarového spoje a s uvedených shrnutí lze konstatovat, že trhlina souvisí s metalurgickou kvalitou plechu a v materiálu byla přítomna již před svařováním.

Seznam obrázků

Obr. 1 - Mikrostruktura oceli S355J2+N	11
Obr. 2 - Tepelné zpracování - PWHT	14
Obr. 3 - Zařízení pro svařování do úzkého úkosu.....	15
Obr. 4 - Úzký úkos s úhlem rozevření 2°	16
Obr. 5 - Přesazení spojovaných materiálů	16
Obr. 6 - Zařízení pro elektrostruskové svařování	17
Obr. 7 - Detail vyplňování svarové mezery	18
Obr. 8 - Tlačný sloup P400 s označením svarových spojů	19
Obr. 9 - Zhotovení KSS dle pWPS	20
Obr. 10 - Vzorek makrostruktury (15% HNO ₃), TOO max. 4 mm, zv. 9:10	25
Obr. 11 - Vzorky mikrostruktury (4% HNO ₃), zv. 200:1	26
Obr. 12 - Umístění vzorků pro měření tvrdosti HV10.....	27
Obr. 13 - Napínací lis 120MN	32
Obr. 14 - Schéma tlačných sloupů ze segmentů P400 č. 1 až 16.....	32
Obr. 15 - Schéma obložení místa svarového spoje topnými dečkami na plechu P400	33
Obr. 16 - Oboustranné svařování do úzkého úkosu plechů P400	34
Obr. 17 - Tlačný sloup č.1- line 1 po kompletaci na montáž.....	35
Obr. 18 - Špatná tvorba svarové lázně během svařování.....	36
Obr. 19 - Vymrštěný útvar ze svarové lázně	36
Obr. 20 - Korozi napadená místa na svarové ploše odkrytá v průběhu svařování	36
Obr. 21 - Označení oblasti UT indikace a míst odběrů vzorků 1, 2 a 3 z plech P400.....	37
Obr. 22 - Detailní zobrazení místa vývrtu vzorku 2	37
Obr. 23 - Vzorek 1, zv.2,4x	38
Obr. 24 - Detail vzorků 2 a 3, zv. 1,1x	38
Obr. 25 - Vzorek 2, zv. 1,7x	38
Obr. 26 - Oxidický povlak, oblast A, zv. 800x.....	40
Obr. 27 - Štěpné porušení, oblast A, zv. 400x	41
Obr. 28 - Říčková kresba, oblast B, zv. 250x	41
Obr. 29- Nekovové částice, oblast B, zv. 300x.....	41
Obr. 30 - Morfologie jamek, oblast C, zv. 600x.....	42
Obr. 31 - Otlaky od vrtání, oblast C, zv. 130x.....	42
Obr. 32 - Rtg spektrální mikroanalýza s přítomností sulfidů manganu ve vzorku 1	42

Obr. 33 - Vzorek 1, zv.1,6x	43
Obr. 34 - Vzorek 3, zv. 1,6x	43
Obr. 35 - Vzorek 2	44
Obr. 36 - Vzorek 3	44
Obr. 37 - Vzorek 2	45
Obr. 38 - Vzorek 2	45
Obr. 39 - Lomová plocha vzorku 1	46
Obr. 40 - Trhliny napětového charakteru v okolí lomové plochy	46
Obr. 41 - Mikrostruktura vzorku 1 v okolí lomové plochy	46

Seznam tabulek

Tab. 1 - Chemické složení pro ploché a dlouhé výrobky tloušťky 400 mm [2]	10
Tab. 2 - Mechanické vlastnosti za okolní teploty pro ploché výrobky tloušťky 400 mm [2]	10
Tab. 3 - Rozsah zkoušení KSS dle PŘÍLOHY B.....	21
Tab. 4 - Tyto hodnoty mechanických vlastností KSS musí být ověřeny.....	21
Tab. 5 - Výsledky příčné zkoušky tahem svarového spoje.....	22
Tab. 6 - Hodnoty R_e , R_m a A při podélné zkoušce tahem	23
Tab. 7 - Naměřené hodnoty tvrdosti dle obr. 11	27
Tab. 8 - Výsledky chemického rozboru v hm. %	39

Seznam použité literatury

Normy, předpisy

- [1] ČSN EN 10025-1, Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část 1: Všeobecné technické dodací podmínky, 2004, 31s
- [2] ČSN EN 10025-2, Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli, 2005, 33s
- [3] ČSN EN 15 614-1, Stanovení a kvalifikace postupu svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování – Část 1: Obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu, Praha, Český normalizační institut, 2005, 31s

Učební texty

- [4] Materiály a jejich svařitelnost –Foldyna V., Hennhofer K., Hlavatý I., Koukal J., Schwarz D., Ostrava září 1999, 296s, ISBN 8-85771-63-2
- [5] Výroba a aplikované inženýrství ve svařování – Barták J., Bubeník V., Bureš J., Burkovič J., Míšek B., Neumann H., Ostrava únor, 2000, 213s, ISBN 80-85771-72-1
- [6] Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení – Majer L., Podhora J., Suchánek M., Vejvoda S., Ostrava listopad 1999. 245s, ISBN 80-85771-70-5
- [7] Technologie svařování a zařízení – Ambrož O., Kandus B., Kubíček J., Ostrava srpen 2001, 391s, ISBN 80-857771-81-0
- [8] UČEBNÍ TEXTY pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory – Barták J., Kovařík R., Pilous V., Ostrava březen 2002, 417s, ISBN 80-85771-97-7
- [9] XXIII. Dny svařovací techniky, ESAB, DT Pardubice, 1998, 248s
- [10] XXIV. Dny svařovací techniky, ESAB, DT Pardubice, 2000, 213s
- [11] Svařování mikrolegovaných a vysokopevných ocelí, sborník přednášek – Hrivňák I., Ostrava-Poruba květen 2001, 175s

Seznam příloh

Příloha A	DTPS tlačného sloupu P400 z oceli S355J2+N
Příloha B	Rozřezový plán pro ověření užitečných vlastností oceli S355J2+N